

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра техніки і електрофізики високих напруг

«На правах рукопису»
УДК 621.3.051.024

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

_____ В. О. Бржезицький

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**на тему: «Вибір обмежувачів перенапруг нелінійних для передачі
електричної енергії на постійному струмі класу 800 кВ»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-61м

Бех Дмитро Віталійович _____

Керівник:

Професор кафедри техніки і електрофізики високих напруг,
д.т.н, професор, Бржезицький В. О. _____

Консультант з розділу маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,
Царьова Т. О. _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра техніки і електрофізики високих напруг

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(спеціалізація «Техніка та електрофізика високих напруг»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора
ТОВ «ІНТЕЛТЕХ»

_____ О. А. Філонова

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

_____ В. О. Бржезицький
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертаційну роботу студенту**

Беку Дмитру Віталійовичу

1. Тема дисертації «Вибір обмежувачів перенапруг нелінійних для передачі електричної енергії на постійному струмі класу 800 кВ», науковий керівник дисертації Бржезицький Володимир Олександрович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від 21.03.2018 р. № 981-с

2. Термін подання студентом дисертації: травень 2018 року

3. Об'єкт дослідження: процеси керування електромеханічним перетворенням енергії в системах електроприводу автономного електротранспорту.

4. Предмет дослідження: електромеханічні системи малорозмірного електробусу для міських перевезень.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз літературних джерел стосовно існуючих обмежувачів перенапруг. Оглянути їх конструкції, принцип дії та основні технічні характеристики.

2. Розглянути схеми підстанцій постійного струму з характеристиками елементів призначених для передачі електричної енергії.

3. Обрати та обґрунтувати конструкцію опор для ліній постійного струму, конструкцію полюса ЛЕП, кліматичні умови для розрахунку та провести розрахунок характеристик грозових імпульсів струму.

4. Розробити методику для вибору обмежувачів перенапруг за електричними характеристиками, механічним навантаженням, визначенням провідності матеріалу ізоляційної покритишки ОПН.

5. Розглянути аспекти комерціалізації проекту з вибору ОПН для передачі електричної енергії на постійному струмі класу 800 кВ. Виконати маркетинговий аналіз.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: структурні та функціональні схеми, принципові однолінійні схеми.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 3 публікації

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Маркетинг високовольтного обладнання	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Аналітичний огляд ОПН постійного і змінного струму	Січень 2018	
	Схеми підстанцій постійного струму з характеристиками елементів	Лютий 2018	
	Розробка математичних моделей розрахунку характеристик ОПН	Березень 2018	
	Розрахунок характеристик ОПН для схеми підстанції постійного струму за допомогою ПК	Квітень 2018	
	Стартап: комерціалізація вибору високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму класу напруги 800 кВ. Маркетинговий аналіз	Травень 2018	

Студент

(підпис)

Бех Д. В.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник

(підпис)

В. О. Бржезицький
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: сторінок – 89, рисунків – 24, таблиць – 16, додатків – 1.

Актуальність роботи. Нелінійні обмежувачі перенапруг стали невід’ємною складовою будь яких електричних мереж. Набігаючі грозові перенапруги, комутаційні перенапруги мережі, короткі замикання на лінії призводять до збудження в лініях великих напруг і струмів, що можуть порушити роботу електричного обладнання підстанцій і навіть вивести його з ладу. Для запобігання таким випадкам на підстанціях і використовуються нелінійні обмежувачі перенапруг. Застосування нелінійних обмежувачів перенапруг дає змогу запобігти таким впливам або зменшити їх наслідки до мінімуму.

Передача електричної енергії на постійному струмі має низку переваг порівняно з передачею на змінному струмі. Але на відміну від змінного струму, на постійному струмі необхідно будувати перетворювальні підстанції, що, в певній мірі, здорожує будівництво мережі. Отже таким підстанціям необхідний більш якісний захист від перенапруг, що можуть прийти з мережі.

Таким чином, розробка методики вибору обмежувачів перенапруг нелінійних для передачі електричної енергії на постійному струмі класу 800 кВ є актуальним завданням сучасної електротехніки.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри техніки і електрофізики високих напруг Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Мета та задачі роботи. Метою роботи є розробка послідовності операцій для вибору ОПН постійного струму класу напруги 800 кВ при проектуванні лінії електропередачі з її основними елементами.

Для досягнення поставленої мети в дисертації необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз літературних джерел стосовно існуючих обмежувачів перенапруг. Оглянути їх конструкції, принцип дії, класифікацію та основні технічні характеристики.
2. Розглянути основні схеми підстанцій постійного струму, що застосовуються в світовій практиці, можливості їх використання, переваги та недоліки систем передачі постійного струму.
3. Обрати та обґрунтувати вибір конструкції полюса ЛЕП постійного струму класу напруги 800 кВ, конструкцію опор. На основі діючих нормативних документів обрати кліматичні умови та виконати розрахунок кількості уражень даної ЛЕП та обрати параметри грозових перенапруг.
4. Розробити методику вибору ОПН постійного струму класу напруги 800 кВ по його основним характеристикам. Методом математичного моделювання виконати розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покришки ОПН.
5. Розглянути аспекти маркетингового розвитку проведеного в роботі дослідження.

Об'єкт дослідження – передача електричної енергії на постійному струмі класу напруги 800 кВ.

Предмет дослідження – методика вибору високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму для класу напруги 800 кВ.

Методи досліджень. Використано діючі нормативні документи розрахунку та вибору нелінійних обмежувачів перенапруг, правила улаштування електроустановок, улаштування блискавкозахисту будівель та споруд та ін.

Наукова новизна. Науково новизна роботи полягає в розробці процедур розрахунку основних електричних характеристик ОПН постійного струму класу напруги 800 кВ та особливостей розрахунку провідності ізоляційної покришки для ОПН такого типу.

Практична цінність. Розроблені процедури можуть бути використані при виборі обмежувача перенапруг нелінійного постійного струму для класу напруги 800 кВ.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на заліку з дисципліни «Науково-дослідна робота за темою магістерської дисертації» в грудні 2017 року та на заліку з переддипломної практики у лютому 2018 року.

Публікації. Результати розробки магістерської дисертації викладено в наукових публікаціях:

1. Бех Д. В.. “METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS WITH POLYMERIC HOUSING”/ Доповіді за матеріалами XVII всеукраїнської студентської науково-практичної конференції Science technology of the XXI century / Наука та техніка XXI століття. — Київ, 2017. — с.6 – 7.

2. Бех Д. В.. “ADVANTAGES OF HVDC”/ Доповіді за матеріалами XVIII всеукраїнської студентської науково-практичної конференції INNOVATIONS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY / Інновації в науці та техніці. — Київ, 2016. — с.23 – 24.

3. Бех Д. В.. “ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕВАГИ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВИСОКІЙ НАПРУЗІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ”/ Доповіді за матеріалами XIII міжнародної науково-практичної конференції «Економіка та менеджмент у кризовий період». — м. Краматорськ, 2017. — с.26 – 27.

Ключові слова: обмежувач перенапруг нелінійний, постійний струм, довжина шляху витоку, енергоємність, залишкова напруга.

SUMMARY

Thesis contains of 89 pages, 24 drawings, 16 tables and 1 appendice.

Rationale/ Justification. Surge arresters have become an integral part of any electrical network. Traveling lightning and switching overvoltage in the network, short circuits on the line lead to excitation in lines of high voltages and currents that can disrupt the operation of the electrical equipment of substations and even disable it. To prevent such cases, surge arresters are used at substations. The use of surge arresters prevents such effects or minimizes their impact.

The DC transmission has a number of advantages over AC transmission. But in case of DC, it is necessary to build converting substations, which to some extent increases the construction of the grid. Therefore, such substations are more in need of high-quality overvoltage protection.

Thus, the development of the method for selecting a surge arrester for DC electric power transmission of 800 kV is of great importance for modern electrical engineering.

Association of the thesis with scientific programs and plans. The thesis was prepared according to the scientific research plan of the High Voltage Technique and Electrophysics Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.”

Purpose and objectives of the research.

The purpose of the work is to develop a sequence of operations for the selection of DC surge arrester for voltage class 800 kV during the design of the transmission line with the main elements.

To achieve this purpose the following objectives were set:

1. To analyze literary sources regarding existing surge arresters. Review their design, principle of operation, classification and basic technical characteristics.
2. To consider major schemes of DC substations currently used in the world practice and the possibility of their application as well as advantages and disadvantages of DC transmission.

3. To substantiate the choice of a design of the pole of DC power supply of 800 kV and the construction of pylons. In accordance with existing regulations, to choose climatic conditions and calculate the number of failures in power transmission lines as well as to choose the parameters of lightning surges.

4. To develop a method for choosing a DC surge arrester for voltage class of 800 kV according to its main characteristics. By the method of mathematical modelling to calculate conductivity of the insulation cover material of a surge arrester.

5. To consider marketing aspects of the conducted research.

Object of research is transmission of electric energy by direct current of a voltage class of 800 kV.

Subject of research is a method for selecting high voltage DC surge arrester for a voltage class of 800 kV.

Methods of research. Analysis of regulatory documents on calculation and choice of surge arresters, rules of installing electric units and lightning protection structures, etc.

Scientific innovation. Scientific innovation of the work is to develop procedures for determining the major electrical quantities of DC surge arrester voltage classes of 800 kV and the particulars of the calculation of the insulation tire for this type of surge arrester.

Practical value of the obtained results consists in the following: the developed procedures can be used when choosing a DC surge arrester for voltage class of 800 kV.

Approbation of the results of the dissertation. The main results of the research were reported and discussed in the test of the discipline "Scientific Research for Master's Degree" in December 2017 and during Research Practice in February 2018.

Publications. The obtained results are described in the three scientific publications:

1. Bekh D. "METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS WITH POLYMERIC HOUSING" / Reports on the materials of the XVII All-Ukrainian Student Scientific and Practical Conference "Science technology of the XXI century". - Kyiv, 2017. - c.6 - 7.

2. Bekh D. "ADVANTAGES OF HVDC" / Reports on materials of the XVIII All-Ukrainian Students' Scientific and Practical Conference INNOVATIONS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY / Innovations in science and technology. - Kyiv, 2016. - c.23 - 24.

3. Bekh D. "ECONOMIC BENEFITS OF ELECTRICITY TRANSMISSION AT A HIGH DISTURBENT PERMANENT STRUCTURE" / Reports on materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Economics and Management in a Crisis Period". - Kramatorsk, 2017. - p.26 - 27.

Keywords: surge arrester, direct current, length of the leakage path, energy capacity, residual voltage.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	14
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОПН ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО СТРУМУ	15
1.1 Загальні відомості ОПН.....	15
1.2 Класифікація ОПН	16
1.3 Принцип дії ОПН і основні елементи	18
1.4 Основні технічні характеристики ОПН	21
Висновки до першого розділу.....	22
2 СХЕМИ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЕЛЕМЕНТІВ	23
2.1 Можливі області застосування електропередач і вставок постійного струму ...	23
2.2 Застосування постійного струму для передачі по ЛЕП, підземним і підводним кабельним лініям	24
2.3 Асинхронні зв'язки	27
2.4 Офшорна передача	31
2.5 Індекс електромагнітного середовища.....	33
2.6 Схеми електропередач і вставок постійного струму	34
2.7 Переваги систем постійного струму	42
2.8 Недоліки систем постійного струму	45
Висновки до другого розділу	46
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	48
3.1 Вибір проводу для лінії електропередачі постійного струму.....	48
3.2 Вибір опори для лінії електропередачі постійного струму	52
3.3 Кліматичні умови	57
3.4 Розрахунок параметрів грозових імпульсів.....	58
Висновки до третього розділу.....	62

4	РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОПН ДЛЯ СХЕМИ ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПК	63
4.1	Розрахунок основних електричних характеристик ОПН.....	63
4.2	Визначення провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН	68
	Висновки до четвертого розділу.....	74
5	СТАРТАП: КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ ВИБОРУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ КЛАСУ НАПРУГИ 800 КВ. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ	76
5.1	Опис ідеї проекту	76
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту	79
5.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
	Висновки до п'ятого розділу.....	84
	ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	85
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	87
	ДОДАТОК 1	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

HVAC	–	high voltage alternating current (висока напруга змінного струму);
HVDC	–	high voltage direct current (висока напруга постійного струму);
IGBT	–	insulated-gate bipolar transistor (біполярний транзистор із ізолюваним затвором);
VSC	–	voltage-source converters (перетворювачі джерела напруги);
BAX	–	вольт амперна характеристика;
ВДЕ	–	відновлювальні джерела енергії;
ВЛ	–	високовольтна лінія;
ВНПС	–	висока напруга постійного струму;
ВПС	–	вставка постійного струму;
ВРП	–	відкритий розподільний пристрій;
ВТВ	–	високовольтні тиристорні вентиля;
ГЕС	–	гідроелектростанція;
ЕП	–	електричне поле;
ЕРС	–	електрорушійна сила;
ЗРП	–	закритий розподільний пристрій;
КЗ	–	коротке замикання;
ККД	–	коефіцієнт корисної дії;
ЛЕП	–	лінія електропередачі;
ЛПС	–	лінія постійного струму;
МЕК	–	міжнародна електротехнічна комісія;
ОПН	–	обмежувач перенапруг нелінійний;
ОПНп	–	обмежувач перенапруг нелінійний з полімерним діелектриком

ПДН	—	перетворювач джерела напруги;
ПЛ	—	повітряна лінія;
ПКК	—	перетворювачі комутовані з конденсатором;
ППС	—	передача на постійному струмі;
ПУБ	—	прямий удар блискавки;
ПУЕ	—	правила улаштування електроустановок;
РБЗ	—	рівень блискавкозахисту;
СЗА	—	ступінь забрудненості атмосфери.

ВСТУП

Передача енергії на постійному струмі – це вже встановлена технологія, вона використовується більше 50 років. Протягом перших 30 років це було перспективна технологія, з обмеженою кількістю проектів на рік. Зі змінами у вимогах, а також у зв'язку з розвитком екологічних потреб, ЛПС стали загальним інструментом у проектуванні та розробці мереж передачі електричної енергії. Основним фактором для цього було зростання потужності останні події в мережах постійного струму, що привели до збільшення напруги до 800 кВ.

Лінії постійного струму тепер є основним методом для підземної та підводної електричної передачі та взаємоз'єднання асинхронних мереж змінного струму, що забезпечує ефективну, стабільну передачу та керування. ЛПС також є технологією вибору для великої магістральної силової передачі, здатної надсилати великі обсяги електроенергії на великі відстані з низькими електричними втратами.

Причини вибору передачі на постійному струмі замість змінного для передачі потужності в якомусь конкретному випадку часто є численними та складними. Передача на постійному струмі приводить до зниження необхідного загального обсягу інвестицій, включаючи питання зниження втрат та/або екологічності. ЛПС мають менший вплив на людину та природне середовище в цілому, що робить ЛПС більш дружнім до навколишнього середовища.

В Україні тільки починають формуватися питання використання постійного струму для передачі електричної енергії та вставок постійного струму між різними енергосистемами. Сама технологія не нова, вона відома ще з часів так званої «війни струмів», але вона знову прийшла вищим витком розвитку технологій завдяки появі IGBT-транзисторів. На даний момент в Україні існує лише один зразок використання даної технології.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОПН ПОСТІЙНОГО І ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Загальні відомості ОПН

Обмежувач перенапруги нелінійний (ОПН) - електричний апарат, призначений для захисту обладнання систем електропостачання від комутаційних і грозових перенапруг. ОПН також можна назвати розрядником без іскрових проміжків. Застосування ОПН на сьогоднішній день є одним з ефективних засобів захисту обладнання електричних мереж від перенапруг [1].

Принцип дії.

Захисну дію обмежувача перенапруг обумовлено тим, що при появі небезпечної для ізоляції перенапруги, внаслідок високої нелінійності його резисторів через обмежувач перенапруг протікає значний імпульсний струм, в результаті чого величина перенапруги знижується до рівня, безпечного для ізоляції обладнання [1].

Основна відмінність матеріалу нелінійних резисторів обмежувачів від матеріалу резисторів вентильних розрядників полягає в різко нелінійній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) та підвищеній пропускну здатності. Застосування в ОПН високонелінейних резисторів дозволило виключити з конструкції апарату іскрові проміжки, що усуває цілий ряд недоліків, властивих вентильним розрядникам [2].

Основний компонент матеріалу резисторів ОПН - оксид (окис) цинку ZnO . Оксид цинку змішують з оксидами інших металів - закисом і окисом кобальту, окисом вісмуту та ін. Технологія виготовлення оксидно-цинкових резисторів вельми складна і трудомістка і близька до вимог при виробництві напівпровідників - застосування хімічно чистого вихідного матеріалу, виконання вимог по точності температурних режимів і т. д. Основні операції при виготовленні - перемішування і подрібнення компонентів, формування (пресування) і випал. Мікроструктура варисторів включає в себе кристали оксиду цинку (напівпровідник n - типу) і міжкристалічного прошарку (напівпровідник p - типу). Таким чином, варистори на основі оксиду цинку ZnO є системою послідовно - паралельно включених p - n переходів. Ці p - n переходи і

визначають нелінійні властивості варисторів, тобто нелінійну залежність величини струму, що протікає через варистор, від прикладеної до нього напруги [2].

1.2 Класифікація ОПН

Обмежувачі перенапруги поділяються на види, залежно від:

1. типу зовнішньої ізоляції (полімерна, порцелянова);
2. конструктивного виконання (одноколонкові, багатокolonкові);
3. класу робочої напруги (6-10 кВ; 35кВ; 110кВ; 220кВ та ін.);
4. місця установлення (ВРП або ЗРП) [1].

Розвиток технології і отриманий на практиці досвід привели до створення трьох типів ОПН, що розрізняються по конструкції корпусу:

1.1 ОПН з порцеляною ізоляцією

Являють собою колонку варисторів, притиснуту до бічної поверхні склопластикової труби, розташованої всередині фарфорової покришки. Набули великого поширення серед захисних засобів, але останнім часом мало користуються попитом у зв'язку з появою ОПН з полімерної покришкою.

Переваги:

- 1) Відносно малий вплив зовнішніх температурних коливань на стан апарату;
- 2) велика механічна стійкість (це пов'язано з тим, що основна механічне навантаження прикладається до ізоляційної покришки).

Недоліки:

- 1) Недостатнє забезпечення герметичності вузла кріплення фланця до порцелянової ізоляційної покришки і збереження властивостей гумових ущільнювачів в процесі тривалої експлуатації;
- 2) Висока вибухонебезпечність (порцелянові уламки під час вибуху розлітаються в різні боки з величезною швидкістю);
- 3) Маса і габарити (обмежувачі в полімерній покришці в 2-3 рази легші, ніж ОПН з порцелянової ізоляцією);

4) Гірші порівняно з полімерними ОПН теплові характеристики [3].

1.2 ОПН з полімерною ізоляцією

ОПН складається з колонки варисторів, укладених в високоміцний полімерний корпус з високомолекулярного каучуку, нанесеного на склопластиковий циліндр. Простір між склопластиковим циліндром і колонкою резисторів заповнюється низькомолекулярних каучуком, а сама склопластикові труба має розрахункову кількість отворів для забезпечення вибухобезпеки конструкції при проходженні струмів короткого замикання. На даний момент ОПН з полімерною ізоляцією (ОПНп) перевершили за масштабами використання та виробництва порцелянові ОПН [1].

Переваги:

- 1) висока гідрофобність;
- 2) значно вища вибухобезпечність, ніж порцелянових ОПН;
- 3) мала вага;
- 4) кращі ніж у ОПН з порцелянвоюю покриття електричні і розрядні характеристики;
- 5) простота монтажу і транспортування, а також стійкість до ударних і вібраційних дій;
- 6) здатність працювати в умовах природних і промислових забруднень і ін.

Недоліки:

- 1) вплив сезонних коливань температури навколишнього середовища (внутрішній простір має коефіцієнт теплового розширення, який значно відрізняється від матеріалу покриття, що може призвести до деформації ребер покриття і зниження електричної міцності зовнішньої ізоляції);
- 2) неправильний розрахунок механічного навантаження може призвести до розтріскування варисторів обмежувача [3].

2.1 Одноколонкові ОПН

Конструктивно складаються з однієї колонки варисторів. Вони випускаються з довжиною шляху витоку зовнішньої ізоляції, яка відповідає ступеням забруднення II, III, IV. Існують одноколонкові ОПН на всі класи напруги, при цьому максимально

використовується обсяг корпусу апарату, що також значно знижує масу ОПН в порівнянні з багатоколонковими ОПН і істотно підвищує надійність роботи [1].

2.2 Багатоколонкові ОПН

Являють собою кілька блоків (модулів), які утворюються з певного числа колонок, з'єднаних або послідовно, або паралельно між собою. Використовуються при великих класах напруги мережі. ОПН складаються з двох або трьох частин (модулів). Така конструкція істотно підвищує надійність роботи ОПН при зволоженні і забрудненні поверхні апарату [3].

1.3 Принцип дії ОПН і основні елементи

Первинним і основним елементом, з чого складається обмежувач перенапруги, служить варистор, що виконує роль нелінійного змінного резистора. Конструктивно ОПН складаються з варисторів, розміщених в корпусі, виготовленому з порцеляни або високоміцного полімеру. Конструкція обмежувача виконана з урахуванням умов, що забезпечують вибухобезпечність, в разі виникнення струмів короткого замикання. Залежно від призначення і місця установлення ОПН можуть бути виконані в різних варіантах. Для обмежувачів, які використовуються для захисту ліній електропередач і обладнання промислових об'єктів, на кришці корпусу передбачений контактний болт для підключення до мережі, в комплект ОПН входить ізольована від контакту з землею плита основи [4].

В даний час варистори для обмежувачів виготовляються як циліндричні диски діаметром 28 - 150 мм, висотою 5 - 60 мм (рис. 1.1). На торцевій частині дисків методом металізації наносяться алюмінієві електроди товщиною 0.05-0.30 мм. Бічні поверхні диска покривають гліфталевою емаллю, що підвищує пропускну здатність при імпульсах струму з крутим фронтом. Діаметр варистора (точніше - площа поперечного перерізу) визначає пропускну здатність варистора по струму, а його висота – параметри по напрузі. При виготовленні ОПН ту чи іншу кількість варисторів – з'єднують послідовно в так звану колонку. Залежно від необхідних характеристик ОПН і його конструкції і наявних на підприємстві варисторів

обмежувач може складатися з однієї колонки (що складається навіть з одного варистора) або з ряду колонок, з'єднаних між собою послідовно / паралельно [2].

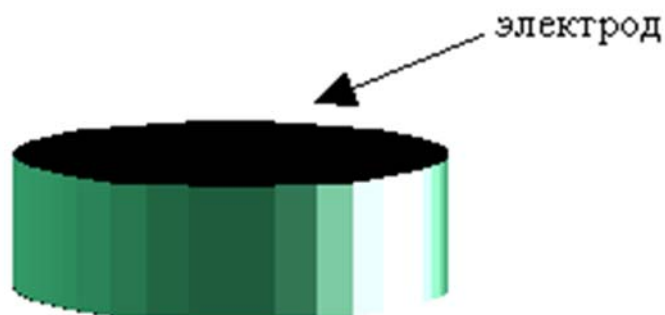


Рис. 1.1 – Нелінійний резистор – варистор

Принцип дії ОПН пояснюється нелінійним характером вольт-амперних характеристик (ВАХ) варисторів. Для їх виготовлення застосовується матеріал, де знаходить застосування окис цинку в суміші з оксидами інших металів. Завдяки складу даної суміші, колонка, зібрана з варисторів є комбінацією паралельних і послідовних включень р-п переходів, що й обумовлює природу вольт-амперних характеристик нелінійних резисторів обмежувачів. Коли характеристики напруги в мережі відповідають номінальним значенням, обмежувач знаходиться в режимі непровідного стану. Величина струму в варисторах має мізерні значення і пояснюється ємнісним характером. При появі в мережі імпульсу напруги, величина якого може викликати пробій ізоляції електрообладнання, в ланцюзі нелінійних резисторів ОПН, відповідно до їх вольт-амперних характеристик, матиме місце виникнення значного імпульсу струму. В кінцевому підсумку це знижує величину перенапруги до параметрів, безпечних для безаварійної експлуатації обладнання. Коли напруга в мережі нормалізується, ОПН знову повертається в непровідний стан [4].

Вольт - амперна характеристика конкретного варистора залежить від багатьох факторів, в тому числі від технології виготовлення, роду напруги - постійного чи змінного, частоти змінної напруги, параметрів імпульсів струму, температури і ін.

Типова вольт-амперна характеристика варистора з найбільшою тривало припустимою напругою 0.4 кВ в наведена на рис. 1.2 [2].

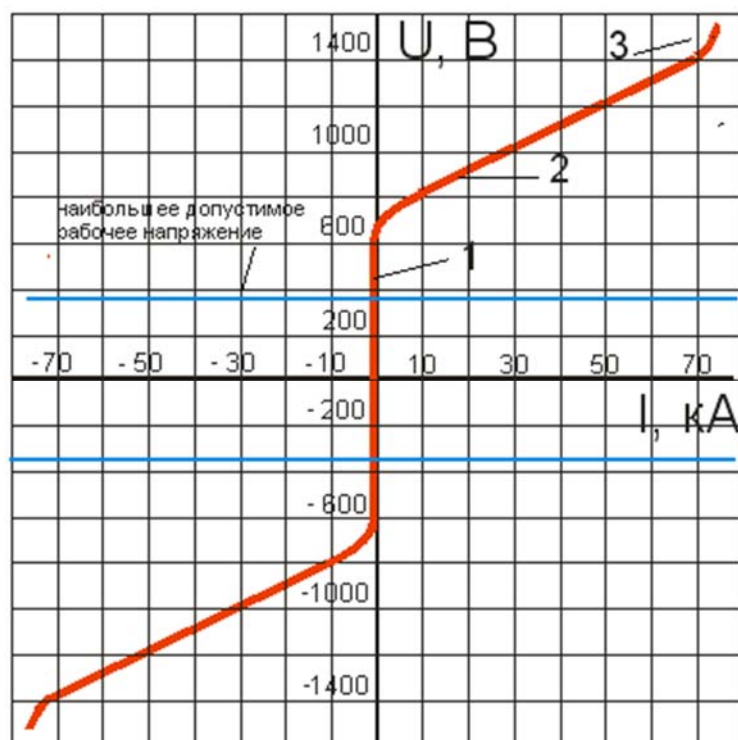


Рис. 1.2 – ВАХ варистора 0,4 кВ [2]

На вольт - амперній характеристиці варистора можна виділити три характерних ділянки: 1) область малих струмів; 2) область середніх струмів і 3) область великих струмів. Область малих струмів - це робота варистора під робочою напругою, що не перевищує найбільшу допустиму робочу напругу. У даній області опір варистора досить значний. В силу неідеальності варистора опір хоча і великий, але не нескінченний, тому через варистор протікає струм, званий струмом провідності. Цей струм малий - десятки частки міліампера. При виникненні грозових або комутаційних імпульсів перенапруг в мережі варистор переходить в режим середніх струмів. На межі першої і другої областей відбувається перегин вольт - амперної характеристики, при цьому опір варистора різко зменшується (до часток Ома). Через варистор короткочасно протікає імпульс струму, який може досягати десятків тисяч ампер. Варистор поглинає енергію імпульсу перенапруги, виділяючи її у вигляді тепла, розсіюючи її в навколишній простір. Імпульс перенапруги мережі "зрізається". У

третій області (великих струмів) опір варистора знову різко збільшується. Ця область для варистора є аварійною [2].

1.4 Основні технічні характеристики ОПН

При виборі обмежувача перенапруг потрібно звертати увагу на такі технічні характеристики:

- 1) Максимальна діюча напруга. Під цим поняттям необхідно розуміти величину максимального значення величини напруги, при якій обмежувач здатний зберігати свою працездатність без обмеження за часом.
- 2) Номінальна напруга, еквівалентна величині, вплив якої ОПН здатний витримувати протягом 10 хвилин.
- 3) Струм провідності. Величина струму в ланцюзі нелінійних резисторів в період дії номінальних значень прикладеної напруги. Як правило, має мізерне значення.
- 4) Номінальний розрядний струм. Параметр, що визначає класифікацію обмежувача в умовах грозового режиму.
- 5) Розрахунковий струм комутаційної перенапруги. Значення струму, що визначає класифікацію при комутаційному перенапруженні.
- 6) Струмова пропускна здатність. Величина еквівалентна класу розряду лінії.
- 7) Стійкість до короткого замикання. Категорія здатності ОПН протистояти струмам короткого замикання, зберігаючи при цьому цілісність захисної оболонки [4].

Висновки до першого розділу

Обмежувачі перенапруги нелінійні – це новий етап у розвитку захисту від перенапруг. Вони мають кращі характеристики ніж попередники (іскрові проміжки та вентильні розрядники). У зв'язку з їх перевагами спостерігається значне підвищення інтересу виробників та науковців до розробки, виробництва та нових методів застосування ОПН. Класифікація ОПН дуже широка, починаючи з різних матеріалів ізоляційної покривки і закінчуючи місцем встановлення. Комбінуючи різні класифікації, кількість різних видів ОПН та їх застосування стає надзвичайно великою.

Новий глобальний інтерес до передачі електричної енергії на постійному струмі і будівництво великої кількості перетворювальних станцій створило попит на новий продукт – ОПН постійного струму. У зв'язку з закритістю та відсутністю публікацій про ОПН на постійному струмі інформація про ці електричні пристрої відсутня.

При виборі будь якого ОПН необхідно звертати увагу на такі параметри:

- максимальна діюча напруга;
- номінальна напруга, еквівалентна величині, вплив якої ОПН здатний витримувати протягом 10 хвилин;
- струм провідності;
- номінальний розрядний струм;
- розрахунковий струм комутаційної перенапруги;
- струмова пропускна здатність;
- стійкість до короткого замикання.

2 СХЕМИ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Можливі області застосування електропередач і вставок постійного струму

Як відомо, в даний час для вироблення електричної енергії, її передачі на відстань, розподілу і споживання використовується змінний струм. Це пояснюється перш за все, здатністю змінного струму до трансформації, тобто зміни напруги за допомогою досить простих апаратів-трансформаторів, а також і тим, що електродвигуни змінного струму за своєю конструкцією значно простіші і, отже, надійніші електродвигунів постійного струму. Завдяки цьому змінний струм використовується практично усюди, за винятком деяких промислових виробництв та електричного транспорту. І тим не менше, в останні десятиліття все частіше для вирішення ряду завдань застосовують постійний струм, в тому числі, пов'язаних з передачею електричної енергії [5].

Система постійного струму високої напруги (ВНПС) має характеристики, які роблять його особливо привабливим для певних застосувань в передачі електричної енергії. Передача ВНПС є найбільш вигідною для далеких великих постачань електроенергії, асинхронних з'єднань і довгих підводних кабелів великого перерізу. Число проектів ВНПС, зафіксованих або розглянутих глобально, збільшилось останніми роками – відображення інтересу, що поновився, до цієї розвиненої технології. Нові проекти перетворювачів розширили потенційний діапазон передачі ВНПС до включення передачі для метрополітену, офшорної, економічної заміни обов'язкової генерації енергії і стабілізації напруги. Цей ширший діапазон передачі сприяв недавньому зростанню передачі ВНПС. Існує приблизно десять нових проектів ВНПС на стадії будівництва або, які активно розглядаються, в Північній Америці разом з ще багатьма проектами, які ведуться по всьому світу [6].

Обидва типи ліній характеризуються однаковими параметрами - активним опором проводів, а також індуктивністю і ємністю. Активний опір проводів визначає

втрати потужності і енергії в лінії і, отже, її ККД, а індуктивність і ємність - електромагнітні процеси в лінії, пов'язані з передачею електроенергії. Для ліній змінного струму ці процеси носять хвильовий характер, що і визначає основні характеристики такої лінії. У лінії постійного струму хвильові процеси відсутні. Саме ця різниця і лежить в основі всіх рішень, пов'язаних із застосуванням постійного струму для транспорту електроенергії [5].

2.2 Застосування постійного струму для передачі по ЛЕП, підземним і підводним кабельним лініям

Використання передачі ВНПС можна бути розділити на різні основні категорії. Попри те, що пояснення для вибору ВНПС є часто економічним, можуть бути інші причини його вибору. ВНПС може бути єдиним дійсним способом з'єднати дві асинхронні мережі, зменшити струми короткого замикання, використати довгі схеми підземного кабелю, обхідне перевантаження мережі, спільно використати службові переваги передачі електроенергії без погіршення надійності і пом'якшити екологічні проблеми. В усіх цих способах використання ВНПС доповнює систему передачі змінного струму [6].

У повітряних ліній змінного і постійного струму відстань між фазами (полюсами) вимірюється метрами (ПЛ 500 кВ змінного струму - 12 м, ПЛ 800 кВ постійного струму - 10 м), у кабельній лінії - декількома сантиметрами. Звідси витікає, що ПЛ має більшу індуктивність і меншу ємність, ніж КЛ. Різниця цих характеристик проявляється при роботі ПЛ і КЛ на постійному або змінному струмі.

Ємність ПЛ змінного струму практично не впливає на потужність, що передається, однак через неї протікає зарядний струм, який створює зарядну потужність лінії і призводить до додаткового нагрівання проводів, тобто збільшує втрати енергії в лінії і знижує її ККД. Крім того, цей струм призводить до небажаного підвищення напруги в проміжних точках лінії і до цілого ряду інших негативних наслідків. Тому виникає необхідність у компенсації зарядної потужності лінії, для чого використовуються спеціальні пристрої - реактори, які, в кінцевому рахунку,

призводять до збільшення вартості лінії. Однак слід зазначити, що необхідність в компенсації зарядної потужності лінії, як правило, виникає лише для ліній надвисоких напруг - 330 кВ і вище [5].

При роботі повітряної лінії на постійній напрузі, коли по ній протікає постійний струм, в сталому режимі індуктивність і ємність не чинять ніякого впливу на процес передачі електричної енергії по лінії і, отже, на максимальну потужність, яку можна передати по лінії при збільшенні довжини останньої. Зарядна потужність лінії постійного струму відсутня в силу викладених вище причин. Тому сама лінія не потребує будь-яких компенсуючих пристроїв [5].

Головний висновок, який може бути зроблений зі сказаного вище, полягає в наступному:

- для повітряної лінії змінного струму існує залежність максимальної потужності, що передається від її довжини - чим довша лінія, тим менше гранична потужність, яку можна по ній передати; це одна з причин, що обмежують допустиму довжину такої лінії;
- повітряна лінія постійного струму не має такого обмеження, тому лінія постійного струму може мати будь-яку довжину і передачу потужності, які диктуються практичною доцільністю. Можливі обмеження - допустимі втрати енергії на нагрів проводів і пропускна здатність використовуваної апаратури.

Розглянемо тепер кабельні лінії. Відомо, що кабельні лінії змінного струму мають вельми обмежену довжину - не більше 15-20 км. Це пояснюється двома основними причинами:

- великий зарядної потужністю, що виникає внаслідок значної ємності кабелю;
- високою вартістю кабелю.

Зарядна потужність призводить до додаткового нагрівання жил кабелю, змушуючи знижувати корисну передавану потужність і обмежувати довжину кабелю. Особливо це відноситься до кабельних ліній високої напруги (110-500 кВ). Тому кабельні лінії змінного струму не можуть бути використані для передачі електроенергії на досить великі відстані [5].

У КЛ постійного струму зарядна потужність відсутня і не створює додаткового нагрівання кабелю. Тому КЛ постійного струму можуть споруджуватися досить довгими (100-200 км, можливо і більше) і використовуватися для вирішення завдань, які неможливо вирішити іншими шляхами, наприклад для перетину великих водних просторів (морських проток), введення великих потужностей в центри великих міст і ін [5].

На відміну від кабелів змінного струму, немає ніякого фізичного обмеження, що обмежує відстань або рівень потужності для підземних або підводних кабелів ВНПС. Підземні кабелі можуть використовуватися на спільних правах застосування з іншими комунальними послугами, не впливаючи на надійність в порівнянні з використанням стандартних методів передачі. Для систем підземних або підводних кабелів існують значні заощадження у витратах на встановлення кабелю і зменшення втрат при використанні передачі ВНПС. Залежно від рівня потужності, який буде переданий, ці заощадження можуть компенсувати більш високі витрати на перетворювальні станції на відстанях 40 км або більше. Крім того, існує зниження в кабельній здатності з передачею змінного струму на відстані із-за його реактивного компонента – зарядного струму, оскільки кабелі мають більш високі ємності і меншу індуктивність ніж повітряні ЛЕП змінного струму. Для цієї області втрати в струмоведучих жилах кабелів лінії ВНПС можуть складати приблизно в двічі менше ніж в кабелях змінного струму. Це відбувається через те, що кабелі живлення змінного струму, вимагають більшої кількості провідників (три фази), переносять реактивний компонент струму, мають вплив скін-ефекту і індукованих струмів в кабельній оболонці і броні.

В кабельній системі змінного струму, потреба збалансовувати нерівні завантаження або ризик після перевантажень на випадок непередбачених обставин часто вимагає використання послідовно з'єднаних реакторів або трансформаторів з зсувом фаз. Цих потенційних проблем не існує в кабельних системах з керованою ВНПС [6].

2.3 Асинхронні зв'язки

Поряд з використанням електропередач постійного струму для транспортування електроенергії їх стали застосовувати для виконання функцій міжсистемних зв'язків значної довжини. Ефективність застосування далеких передач постійного струму обумовлена не тільки підвищенням стійкості міжсистемних зв'язків, але й низькими втратами активної потужності, зменшенням розмірів конструкцій біполярної лінії в порівнянні з трифазною повітряною лінією при однаковій потужності (рис. 2.1), відсутністю обмежень довжини передачі та можливістю швидкого регулювання величини потужності та напрямків її передачі за рахунок оборотності випрямлячів в інвертори і навпаки [7].

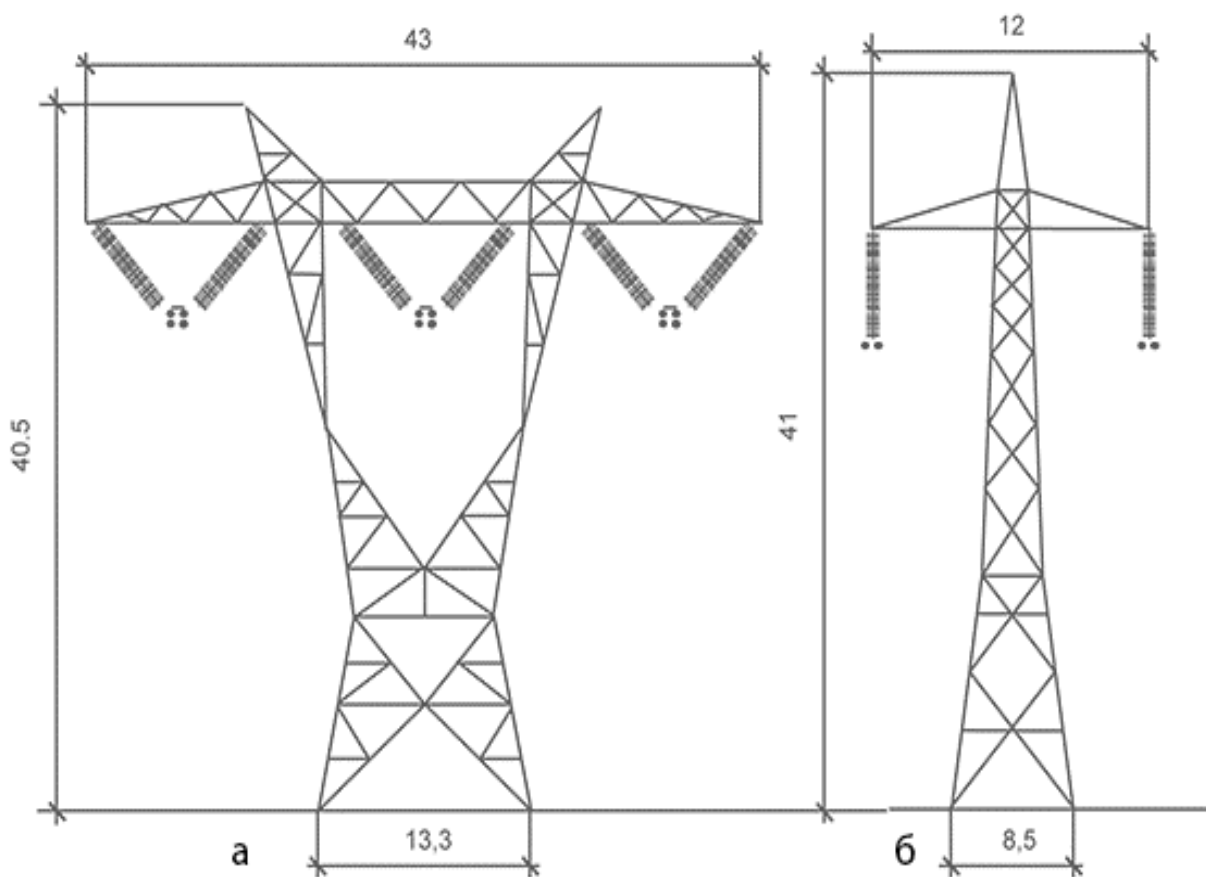


Рис. 2.1 – Порівняння опор ПЛ 800 кВ змінного струму (а) та ПЛ ± 500 кВ постійного струму (б) для однакової передаваної потужності (розміри зазначені в метрах) [7]

В даний час в світі використовуються дві частоти змінного струму - 50 і 60 Гц. У країнах Європи, СНД і Росії прийнята частота 50 Гц; в США, Канаді, деяких країнах Південної Америки, південній частині Японії - 60 Гц. Об'єднання систем з різною номінальною частотою на паралельну роботу з допомогою ліній змінного струму неможливо. Для цієї мети, як показує світова практика, може бути з успіхом використаний постійний струм. Такі зв'язки існують в Японії і Південній Америці. Для таких зав'язків використовуються вставки постійного струму (ВПС), або відповідно до стандарту МЭК 60099-9:2014 схема «back-to-back [8]»:

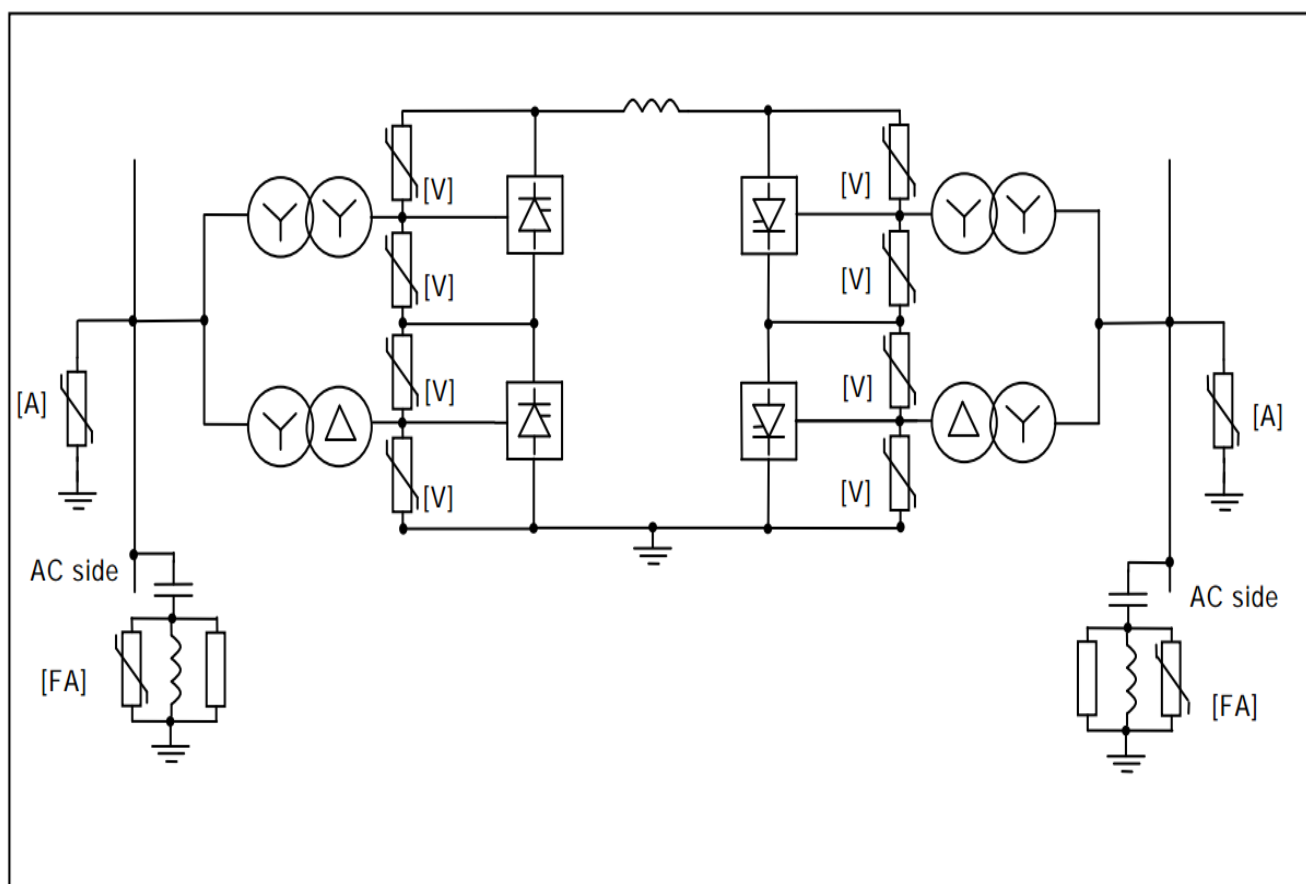


Рис. 2.2 – Однолінійна схема лінії компенсаційної перетворювальної станції з двома конвертерами з 12-фазними випрямлячами (інверторами) послідовно (вставка постійного струму)

Вставки систем передачі ВПС можуть бути зроблені між асинхронними мережами для більш економічної або надійної роботи системи. При асинхронному з'єднанні можливий взаємозв'язок між системами при забезпеченні буфера між цими

двома системами. Часто ці з'єднання використовують компенсаційні перетворювачі без лінії передачі. Асинхронний ВНПС виконує дію як ефективний "брандмауер" проти поширення каскадних відключень електрики в одній мережі до передачі до іншої мережі [6].

Якщо лінію постійного струму використовувати для об'єднання кількох систем, то в цьому випадку всі ці системи можуть працювати незалежно одна від одної, але обмінюватися між собою потужністю. У цьому випадку лінія постійного струму стає як би збірними шинами для цих систем. При цьому аварійні збурення в одній з систем не будуть передаватися в інші на відміну від того, як це було б при зв'язку на змінному струмі [5].

Системний ефект може проявитися також і в разі, коли ланка постійного струму шунтує існуючі міжсистемні зв'язки змінного струму. Тут за рахунок її високої керованості можна забезпечити перерозподіл потоків потужності по цим зв'язкам з метою підвищення економічності роботи пов'язаних систем і при необхідності зберегти стійкість їх синхронної роботи [5].

Багато асинхронних з'єднань існують в Північній Америці між Східними і Західними взаємопов'язаними енергосистемами, між радою з електронадійності Техасу (ERCOT) і її сусідами, [наприклад, Мексика і Південно-західне енергетичне водосховище (SPP)], між Квебеком і його сусідами (наприклад, Нова Англія і Маритаймс). Північно-східне відключення живлення в серпні 2003, як показала практика "брандмауера", спрацювало проти каскадних відключень електрики, що були забезпечені в системах з асинхронними з'єднаннями. Тоді відключення електрики виникло і поширилось по нижніх Великих озерах і через Онтаріо і Нью-Йорк, де зупинилося в асинхронному інтерфейсі з Квебеком. Квебек був незачеплений; слабкі з'єднання змінного струму між Нью-Йорком і Новою Англією знеструмились, але зв'язки ВНПС з Квебека продовжували поставляти живлення до Нової Англії [6].

Електропередача постійного струму може проявити свої якості ще в одній області. Відомо, що характерна особливість гідротурбін полягає в тому, що їх максимальний ККД досягається при незмінній швидкості обертання їх робочого

колеса, тобто при постійній частоті змінного струму, що може бути досягнуто лише при постійному рівні води у верхньому б'єфі (при постійному напорі води, на який проектується турбіна) або при незначних його коливаннях. Такі режими можливі лише для гідроелектростанцій з великими обсягами водосховищ, коли водосховище заповнене до проектної позначки. Для всіх інших ГЕС при незмінній швидкості обертання робочого валу при спрацьовуванні водосховища і зниженні напору води турбіни будуть знижувати свій ККД. Особливо це явище буде проявлятися на приливних ГЕС і на ГЕС з великими обсягами водосховищ в період їх заповнення [5].

Взаємозв'язок між асинхронними мережами часто здійснюється в периферії відповідних систем, де мережі мають тенденцію бути слабкими по відношенню до необхідної передачі потужності. Більш високі передачі потужності можуть бути досягнуті з поліпшенням стійкості напруги в слабких системних зв'язках при застосуванні ПМК. Динамічна підтримка напруги і поліпшена стійкість напруги, яка пропонується перетворювачами на основі ПДН, дозволяють забезпечити ще більш високу передачу потужності без потреби в зміцненні системи змінного струму. ПДН не мають комутаційних відмов, реалізуючи варіанти економічної потужності, які інвертують напрям живлення та можуть бути виконані без яких-небудь обмежень, оскільки не мають мінімальної потужності або обмежень по струму [6].

Таке рішення було використано ще в далекому 1965 році, при будівництві ВПС «Волгоград–Донбас». ПЛ постійного струму Волгоград–Донбас — біполярна лінія напругою ± 400 кВ, довжиною 475 кілометрів, що передає електроенергію від Волзької гідроелектростанції до Донбасу і навпаки. ПЛ Волгоград–Донбас — це друга лінія постійного струму (після лінії Москва–Кашира) побудована в Радянському Союзі, з потужністю передачі до 750 МВт електроенергії. На 2015 рік лінія перебувала в поганому стані і працювала на напрузі 400 кВ [9].

Станом на грудень 2014 лінія для передачі електроенергії не використовувалася. У березні 2015 року планувалося виведення лінії з експлуатації з подальшим демонтажем. На Волзькій ГЕС перетворювальне обладнання демонтовано. Аж до липня 2014 лінія перебувала під охоронною напругою 220кВ з ПС Михайлівська (НЕК України) [9].

морі, де потужність для компресорів подається від берега для скорочення викидів вуглецю і більш високі витрати О&М, пов'язані з менш ефективною генерацією, що знаходиться на базі платформи.



Рис. 2.4 – Джерело живлення ПДН для офшорної виробничої платформи.



Рис. 2.5 – Перетворювач ПДН для офшорної вітрової генерації.

Великі віддалені масиви генерації вітру вимагають системи колекторів, і підтримки реактивної потужності на виході передачі. Передача від генерації вітру

повинна часто проходити через живописні або екологічно чутливі зони або водойми. Багато кращих вітрових ділянок з більш високими коефіцієнтами використання потужностей розташовані на шельфі. Основана на ПДН передача ВНПС дозволяє ефективно використовувати довгих наземних або підводних кабелів і забезпечує реактивну підтримку комплексу генерації вітру.

На рисунку 2.5 представлений проект для офшорної перетворювальної станції, розробленої до потужної передачі від офшорної генерації вітру [6].

2.5 Індекс електромагнітного середовища

При спорудженні ВЛ постійного струму особлива увага приділяється їх впливу на людину і навколишнє середовище. Облік екологічного впливу багато в чому визначає вибір конструкції полюса ВЛ постійного струму. Основними впливаючими факторами ВЛ на навколишнє середовище є напруженість ЕП у землі, напруженість магнітного поля і щільність іонного струму, що створюються при коронуванні проводів. Коронний розряд на проводах служить джерелом радіо- і телевізійних перешкод, акустичних шумів. На ПЛ змінного струму об'ємний іонний заряд у поверхні землі практично відсутній внаслідок пульсації поблизу проводів. На ПЛ постійного струму весь простір між полюсами і землею заповнено об'ємним іонним зарядом відповідної полюсу полярності, який рухається під дією ЕП до землі. На біполярних ВЛ велика частина іонного струму протікає між полюсами різної полярності. При цьому уніполярні струми, що протікають від кожного полюса до землі, складають лише невелику частку від сумарного іонного струму [10].

В даний час максимальна межа міцності для електричного поля під ЛЕП постійного струму у всьому світі становить 25-40 кВ/м. У Китаї, межа становить 30 кВ/м для ЛЕП постійного струму ± 800 кВ. Для ЛЕП постійного струму звукова межа шуму 40- 45 дБ. У Китаї, для ЛЕП постійного струму ± 800 кВ звукова межа шуму становить 45 дБ. Це відповідає міжнародним стандартам.

Щоб відповідати межам електромагнітного середовища і радіоперешкодам, 6 або більше розщеплених проводів повинні використовуватись на основі таких вимірів:

- 1) склад провідного полюса – провідники та ізоляційні деталі;
- 2) відстань між полюсами провідників;
- 3) висота полюсів провідників.

Крім того, стан поверхні провідника і деталі повинні бути розроблені і оброблені належним чином. Відстань між полюсами провідника 22/20 м залежно від різних конструкцій і провідників, відповідна висота 18/21 м для нежитлових та житлових кварталів відповідно. Межі електромагнітного середовища лінії ± 800 кВ постійного струму і конвертерної станції, представлені SGCC, були прийняті стандартом електроенергетики Китаю і записані в технічний звіт МЕК, "обмеження електромагнітного середовища в межах лінії передачі ультрависокої напруги постійного струму" (МЕК / TR 62 681). Результати були широко застосовані для ліній ± 800 кВ ультрависокої напруги постійного струму [11].

2.6 Схеми електропередач і вставок постійного струму

Структурні схеми ППС і ВПС наведені на рис. 2.6. У електропередачах постійний струм використовується лише для транспорту електричної енергії від виділеної електростанції в приймальну систему або з однієї системи в іншу. Для цього електрична енергія змінного струму, що виробляється генераторами передавальної системи, повинна бути спочатку перетворена в енергію постійного струму, в такому вигляді передана по лінії, потім знову перетворена, але вже в енергію змінного струму і передана до приймальної системи [5].

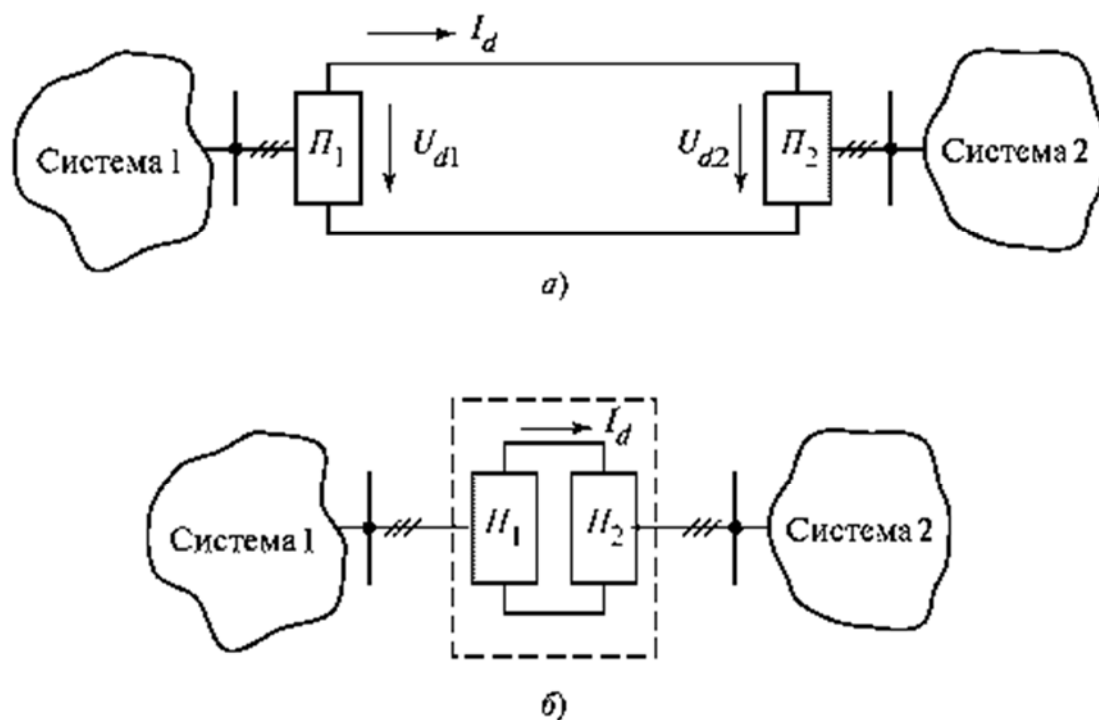


Рис. 2.6 – Структурні схеми ППС (а) і ВПС (б)

У схемі, де використовується вставка постійного струму, транспорт енергії на відстань здійснюється на змінному струмі. Причому зазвичай відстань ВПС порівняно невелика, так як вона використовується для зв'язку та з'єднує одна до одної системи. Постійний струм тут грає лише роль ланки, яка повністю розв'язує з'єднані системи по частоті і, з цієї точки зору, робить їх незалежними одна від одної [5].

Перетворення електричної енергії здійснюється перетворювачами Π_1 і Π_2 , пов'язаними з передавальною і приймальною системами. Перетворювач, який перетворює енергію змінного струму від передавальної системи в енергію постійного струму, називається випрямлячем. Інший перетворювач, який отримує енергію від випрямляча і перетворює її в енергію змінного струму, віддаючи цю енергію в приймальну систему, називається інвертором [5].

Перетворювачі мають властивість реверсивності: при необхідності зміни напрямку передачі потужності випрямляч стає інвертором, а інвертор - випрямлячем. При цьому напрямок струму в лінії залишається незмінним, так як вентиля в перетворювачах пропускають струм тільки в одному напрямку, але змінюється полярність самих перетворювачів [5].

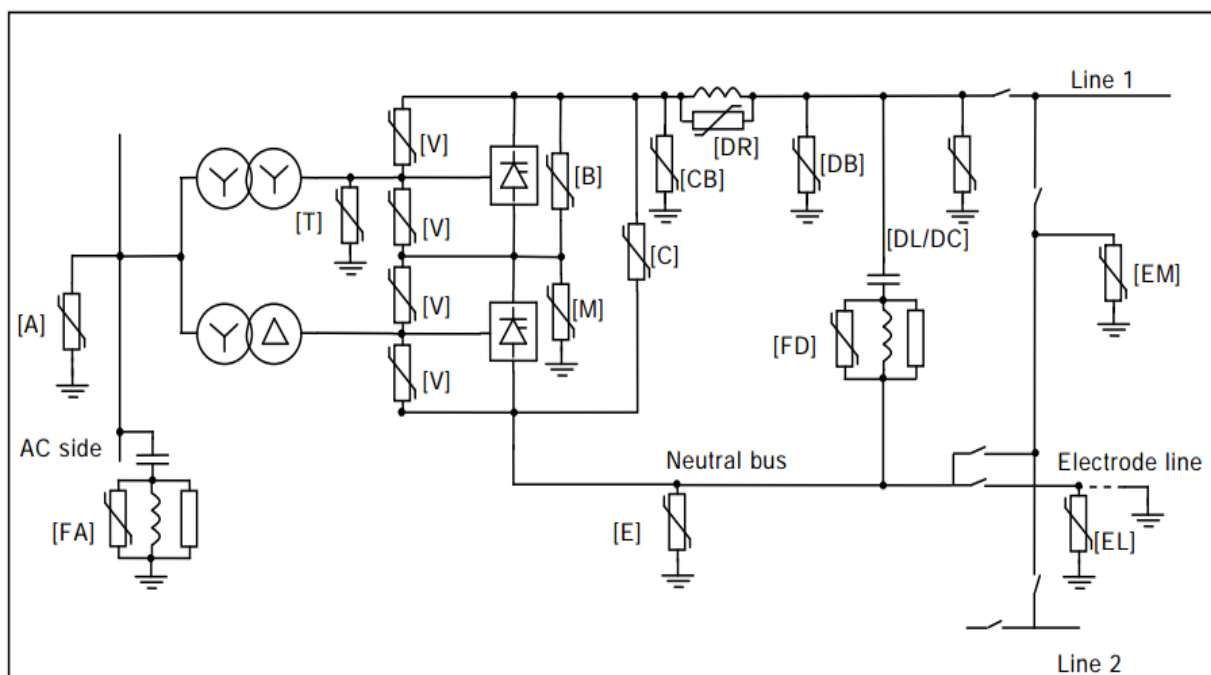


Рис. 2.8 – Однолінійна схема типової перетворювальної підстанції з одним 12-фазним перетворювальним мостом на полюс

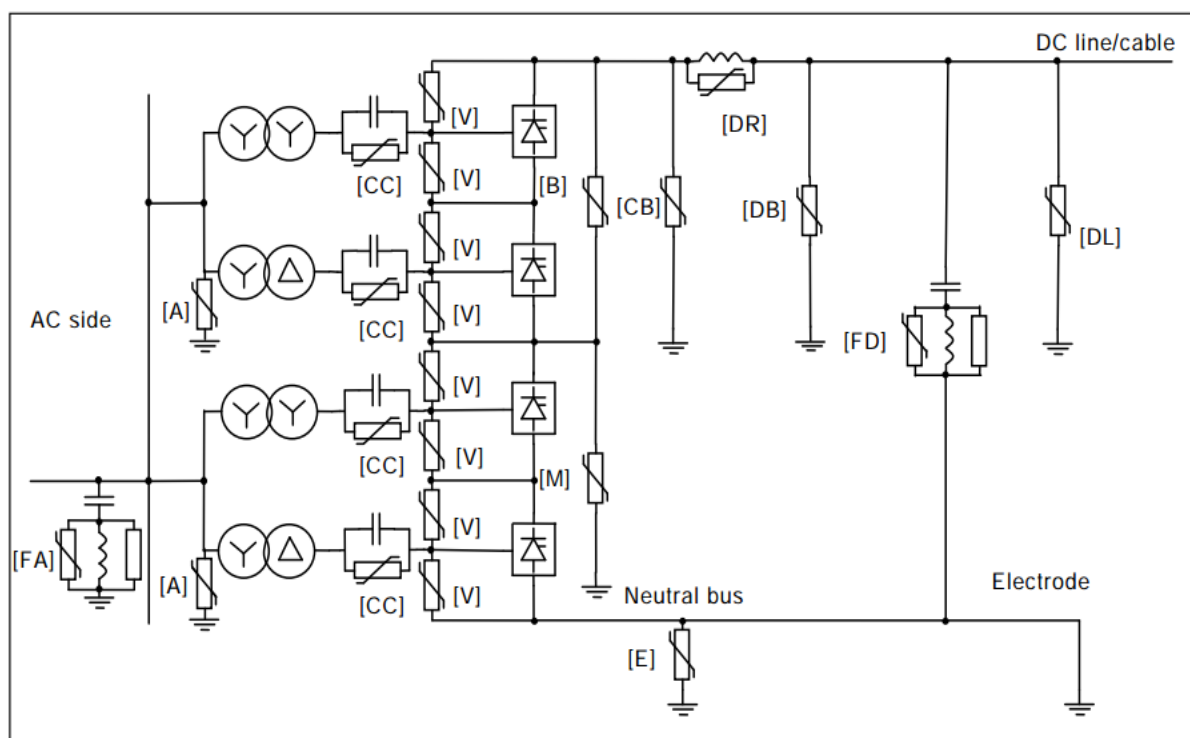


Рис. 2.9 – Однолінійна схема типового конвертора з комутованим перетворювачем (ССС) з двома 12-фазними перетворювачами послідовно

Іншим важливим елементом перетворювального блоку є трансформатор, який пов'язує перетворювальний міст з мережею передавальної або приймальної системи. Цей трансформатор виконує дві функції:

- 1) створює необхідну випрямну напругу U_{dm} , що забезпечується вибором відповідного коефіцієнта трансформації;
- 2) електрично відокремлює ланцюг випрямленого струму від мережі змінного струму.

Необхідність такої гальванічної розв'язки пояснюється наступним обставиною. При глухо заземленій нейтралі мереж 220-500 кВ, куди підключаються входи перетворювачі ППС і ВПС (та на потенціалах фаз), потенціали фаз по відношенню до землі жорстко фіксовані і в нормальних режимах не перевищують амплітуди фазної напруги. У той же час потенціали окремих мостів по відношенню до землі при їх послідовному з'єднанні різні, і потенціал полюса може істотно перевищувати потенціал фази. Так, наприклад, при $U_{d_m} = \pm 750$ кВ і напрузі мережі 500 кВ потенціал полюса дорівнює 750 кВ, амплітуда фазного напруги мережі становить 407,5 кВ. Звідси виникає необхідність їх електричного поділу [5].

Обмотку трансформатора, приєднану до мережі живлення, зазвичай називають мережевою обмоткою, а обмотку, підключену до вентильному мосту, вентильною. Групами з'єднань обмоток трансформатора, які зазвичай застосовуються на практиці, є Y / Y-12 або Y / D-11. При цьому з метою зменшення вмісту струмів вищих гармонік в струмі фази ці групи зазвичай використовують в поєднанні одна з одною [5].

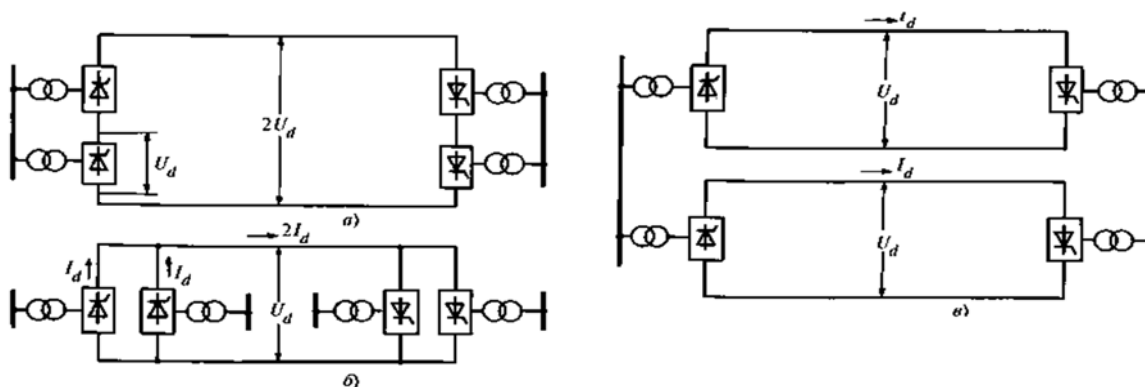


Рис. 2.12 – Можливі схеми збільшення потужності ППС (а – збільшення напруги лінії; б – збільшення струму полюса; в – дволанцюгова лінія)

Оскільки ланцюги змінного і постійного струму в ППС електрично не пов'язані, то, якщо в ланцюзі постійного струму відсутній зв'язок з землею, потенціали щодо землі в цьому ланцюзі будуть визначатися випадковими чинниками, головним чином струмами витоку по ізоляції, що неприпустимо, так як в цьому випадку неможливо здійснити координацію ізоляції. Тому хоча б одна з точок в ланцюзі постійного струму повинна бути заземлена. На практиці в ППС зазвичай заземлюють дві точки. Це можуть бути або один з полюсів передачі, або середні точки перетворювальних підстанцій. У першому випадку, коли з двох сторін заземлюється один з полюсів передачі, провід цього полюса зазвичай відсутній, його роль виконує земля. Для постійного струму опір землі дорівнює нулю або наближається до нього. Тому опір заземленого полюса буде визначатися тільки опором розтікання заземлювачів, за допомогою яких полюс з'єднується з землею. Це опір має дуже малу величину (0,05-0,15 Ом) і тому не впливає на режим передачі. В результаті для електропередачі потрібен тільки один полюс, підвішений на ізоляторах, якщо лінія повітряна, або одножильний кабель, прокладений в землі або по дну морської протоки. Такі передачі називаються уніполярними, або монополярними. Використання землі для повернення струму має і свої негативні сторони. Найбільш істотним недоліком тут є можливість корозійного руйнування металевих інженерних споруд, прокладених в землі поблизу заземлення, - трубопроводів, кабелів. Частина струму передачі буде поширюватися по цих спорудах і, стікаючи з них, може викликати їх пошкодження за рахунок електролізу аж до утворення отворів в трубопроводах або оболонках кабелів [5].

Для потужних електропередач застосовують іншу схему, де лінія виконана з двома полюсами, кожен з яких ізолюваний від землі. Заземляються середні точки перетворювальних підстанцій, розташованих по кінцях передачі. Така передача називається біполярної. Іноді такий ланцюг називають БІПОЛЬ. При необхідності збільшення потужності передачі споруджують другий такий же ланцюг. Так зроблено на ППС Ітайпу, де потужність кожного Біполя становить 3150 МВт. Для біполярних передач розрізняють два види напруги лінії: напруга полюс-земля $U_{дп-з}$ і напруга полюс-полюс $U_{дп-п}$. Очевидно, що напруга полюс-полюс в 2 рази більше напруги полюс-земля. Тому передача з напругою, наприклад, ± 500 кВ і передача 1000 кВ – це

одна і та ж передача. Лінії постійного струму як уніполярні, так і біполярні не мають лінійних вимикачів. Їх роль з успіхом виконують керовані вентиля перетворювача. При виникненні аварійних ситуацій в лінії постійного струму досить зняти керуючі імпульси з вентилів випрямляча (закрити вентиля), щоб струм в лінії припинився. Закриття вентилів може бути виконано як вручну черговим персоналом підстанції, так і автоматичними пристроями захисту, що реагують на виникнення пошкодження [5].

Відсутність лінійних вимикачів спрощує конструкцію перетворювальної підстанції та сприятливо відбивається на її економічних показниках. Однак таке рішення може бути прийнято лише для магістральних електропередач, тобто передач, які не мають проміжних підстанцій. Для передач з проміжними підстанціями (мережі постійного струму) необхідне застосування вимикачів постійного струму, призначених для локалізації аварій, які можуть виникнути на окремих ділянках мережі. Електропередача постійного струму так само, як передача змінного струму, має коефіцієнт корисної дії, який визначається втратами потужності і енергії в елементах цієї передачі. В даному випадку ці втрати складаються з втрат потужності і енергії в обладнанні перетворювальних підстанцій і в лінії постійного струму. Відносні втрати потужності в основному обладнанні підстанцій і витрата потужності на власні потреби у відсотках від номінальної потужності підстанції наводяться нижче [5].

Таблиця 2.1 – Відносні втрати потужності на обладнанні та на власні потреби

Перетворювальні трансформатори	1,3—1,5 %
Перетворювачі	0,5—0,7 %
Фільтри вищих гармонік	0,018—0,020 %
Лінійні реактори	0,17—0,20 %
Власні потреби	0,1 %
Всього	2,1—2,5 %

Як можна бачити, перетворювальна підстанція з точки зору втрат потужності є досить економічним елементом.

2.7 Переваги систем постійного струму

Розвиток високовольтних систем постійного струму (ЛПС / HVDC систем) в системах електропередачі триває завдяки наступним перевагам:

- ✓ Відсутні втрати на випромінювання, так як електромагнітні хвилі випромінює тільки провідник зі змінним струмом.
- ✓ У мережі немає реактивної (паразитної) потужності і, отже, витрат на боротьбу з нею, тобто немає коефіцієнта потужності і необхідності його поліпшення.
- ✓ Економія на матеріалах опор, проводів ЛЕП.
- ✓ Більш проста конструкція лінії.
- ✓ Може бути використане повернення через землю. Мається на увазі, що менше втрати на струми Фуко та блукаючі струми, тому що в HVAC лініях також використовується ця система.
- ✓ Немає зарядного струму, тобто змінного струму що йде на підзарядку ємностей лінії. Це особливо важливо в підземних/підводних кабелях. Тому в підводних лініях HVDC використовується вже кілька десятиліть.
- ✓ Немає скін ефекту.
- ✓ Кабелі можуть працювати при більш високому градієнті напруги (так як немає струмів Фуко).
- ✓ Коефіцієнт потужності лінії завжди дорівнює одиниці: реактивної потужності немає, лінія не потребує реактивної компенсації.
- ✓ Менший коронний розряд і радіоперешкоди, особливо в погану погоду.
- ✓ Синхронна робота не вимагається.
- ✓ Дистанція лінії не обмежена вимогами стабільності.
- ✓ Можуть з'єднуватись системи змінної напруги з різними частотами.
- ✓ Низький струм КЗ в лінії.
- ✓ Регулювання перетоків потужності легко здійснюється / контролюється.

✓ При передачі електроенергії на змінному струмі пікові значення перенапруг складають 2-3 значення напруги передачі, а при використанні постійного струму це значення складає 1,7 нормальної напруги.

Основна перевага HVDC - це можливість передати більшу кількість енергії на велику відстань з меншими капітальними витратами і меншими втратами, ніж в лініях змінного струму. В залежності від рівня напруги і конструкційних особливостей втрати становлять близько 5% на 500 км. HVDC дозволяють більш ефективно використовувати енергетичні джерела, віддалені від навантажувальних центрів [12], [13].

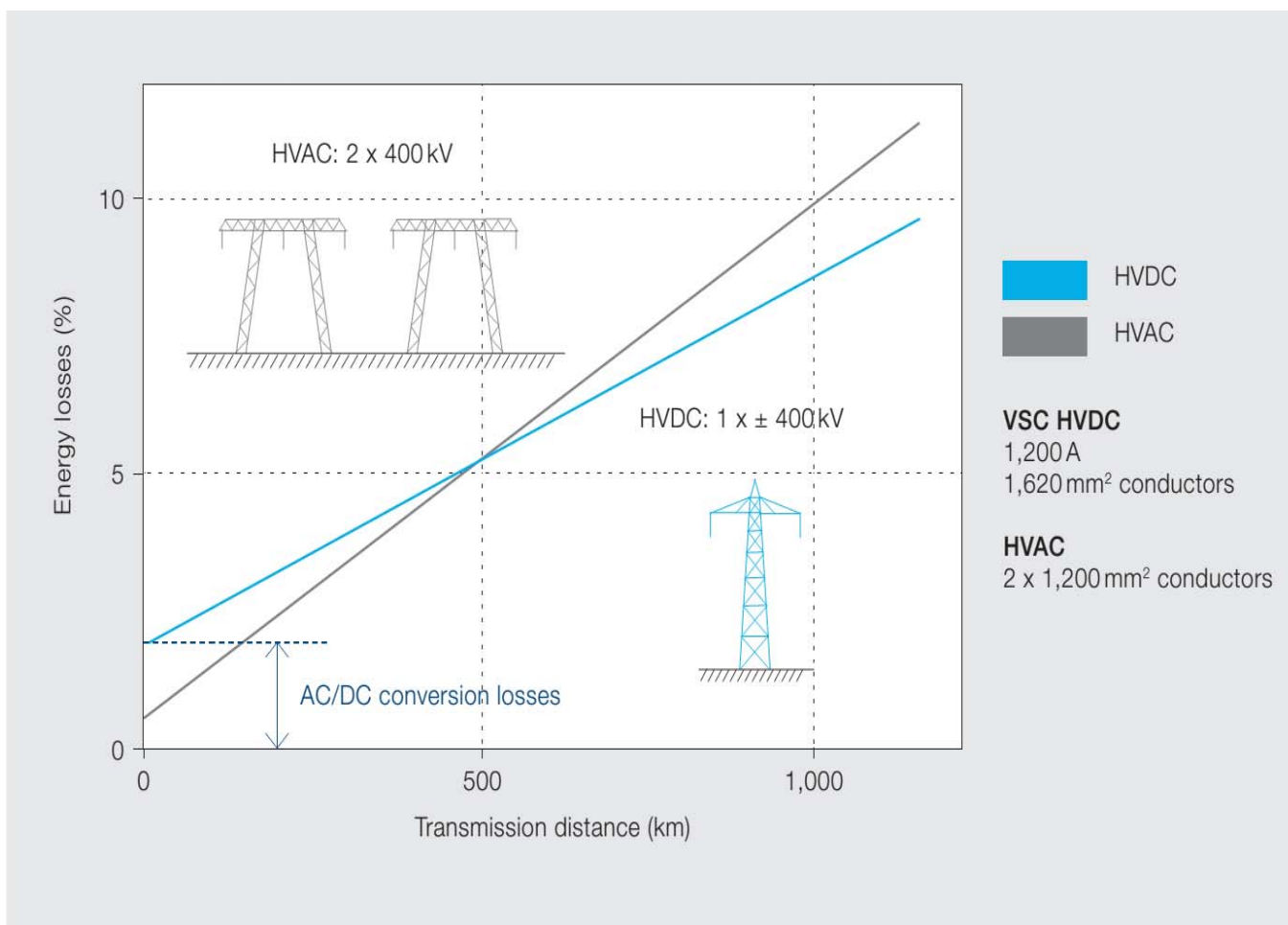


Рис. 2.13 – Порівняння втрат електроенергії для різних видів струму

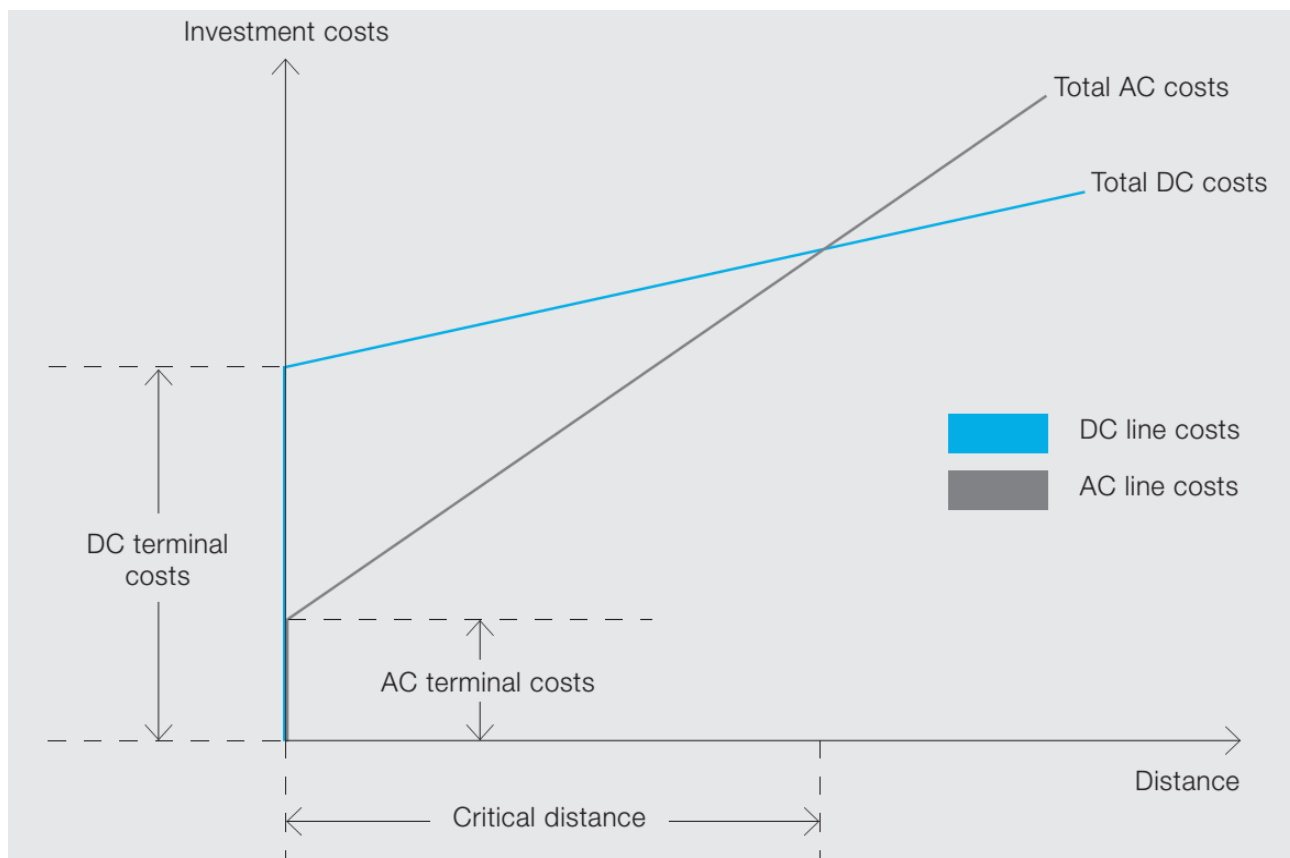


Рис. 2.14 – Графік залежності капіталовкладень в залежності від використання виду струму.

Основні приклади, де використання HVDC більш ефективно, ніж HVAC:

1. Підводні кабелі (наприклад, 250 км Балтійського кабелю між Швецією і Німеччиною, 600 км кабелю NorNed між Норвегією і Голландією, 290 км зв'язка Basslink між Австралійським материком і Тасманією). В підводних кабелях лінії змінного струму неефективні по причині втрат на струми Фуко в солоній воді.
2. Далекомагістральні потужні лінії електропередачі типу «кінцева точка – кінцева точка» без проміжних відгалужень, наприклад, у віддалених (незаселених) областях.
3. Збільшення потужності існуючої силової мережі в ситуаціях, де додаткові дроти встановлювати важко або дорого.
4. Передача потужності і стабілізація між несинхронізованими розподільними системами змінної напруги.

5. Підключення віддаленої генеруючої електростанції до головної мережі, наприклад: Nelson River DC Transmission System.

6. Зниження ціни лінії електропередачі. HVDC потребує меншої кількості провідників так як немає необхідності підтримки багатофазних систем. Так само, через відсутність скін-ефекту можуть використовуватися більш тонкі провідники.

7. Полегшення передачі (обміну) енергією між країнами (районами, мережами), які використовують різні частоти промислової мережі та створення об'єднаних енергосистем.

8. Синхронізація мереж змінної напруги, згенерованої ВДЕ [12, 13, 14].

2.8 Недоліки систем постійного струму

В природі не буває нічого ідеального, тому незважаючи на всі переваги ліній постійного струму, як завжди, існують недоліки. Приведемо приклади основних з них [12]:

- для постійного струму перетворювальні підстанції на порядок дорожчі, ніж підстанції для змінного струму;
- необхідність використання фільтрів, так як перетворювальні підстанції працюють на IGBT-транзисторах, через це на виході присутні гармоніки, тому для передачі електроенергії нормованої якості необхідно додатково встановлювати фільтри;
- необхідність висококваліфікованого персоналу для роботи;
- складність побудови мультитермінальної (мережа з великою кількістю споживачів) мережі;
- конвертори, сполучені з системою змінної напруги, зтикаються з проблемою реактивної потужності [12].

Висновки до другого розділу

1. Можливі області застосування постійного струму в сучасній електроенергетиці, до них слід віднести:

- далекі електропередачі, наприклад від віддалених гідро або атомних електростанцій. Відстані до яких можуть сягати сотні або навіть тисячі кілометрів. Економічна межа між ЛЕП змінного і постійного струму, може бути в межах від 400 до 500 км в залежності від вимог надійності, умов проходження траси, цін на обладнання та ряду інших факторів;
- передача електроенергії через великі водні простори;
- глибокі вводи великої потужності в центри великих міст;
- асинхронні зв'язки між системами, що дозволить підвищити живучість об'єднаної системи;
- зв'язок систем змінного струму з різною номінальною частотою;
- створення «шин постійного струму», до яких можуть бути приєднані електричні системи різних районів, регіонів або країн, що працюють несинхронно або з різною частотою;
- підключення до системи електростанцій, що працюють з різною частотою обертання агрегатів, щоб забезпечити більш ефективну роботу цих агрегатів;
- розв'язка кілець, щоб зменшити некеровані потоки потужності, які виникають при розвитку об'єднаної системи.

Очікується, що з огляду на нову енергетичну епоху та необхідність побудови більш розумної мережі, ЛПС, як очікується, вийде далеко за рамки її традиційної позиції як доповнення до передачі змінного струму.

Передача енергії на постійному струмі – це вже встановлена технологія, вона використовується більше 50 років. Протягом перших 30 років це була перспективна технологія, з обмеженою кількістю проєктів на рік. Зі змінами у вимогах, а також у зв'язку з розвитком екологічних потреб, ЛПС стали загальним інструментом у проєктуванні та розробці мереж передачі електричної енергії. Основним фактором

для цього було зростання потужності останні події в мережах постійного струму, що привели до збільшення напруги до 800 кВ.

Лінії постійного струму тепер є методом для підземної електричної передачі та взаємоз'єднання асинхронних мереж змінного струму, що забезпечує ефективну, стабільну передачу та керування. ЛПС також є технологією вибору для великої магістральної силової передачі, здатної надсилати великі обсяги електроенергії на дуже великі відстані з низькими електричними втратами. Це робить її ключовою технологією для подолання величезної проблеми з виробництвом відновлюваних джерел енергії, таких як вітер, сонячна енергія та гідроенергія, – ці ресурси рідко зустрічаються поблизу населених пунктів, де існує необхідність в них.

Причини вибору передачі на постійному струмі замість змінного для передачі потужності в якомусь конкретному випадку часто є численними та складними. Передача на постійному струмі призводить до зниження необхідного загального обсягу інвестицій, включаючи зниження втрат та/або екологічного впливу. ЛПС мають менший вплив на людину та природне середовище в цілому, що робить ЛПС більш дружнім до навколишнього середовища.

У багатьох випадках посилення на ЛПС обґрунтовуються на основі поєднання технічних, економічних та екологічних переваг.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Вибір проводу для лінії електропередачі постійного струму

Схема заміщення передачі постійного струму для сталого режиму наведена на рис. 1. У цій схемі випрямляч представлений ЕРС E_B , а інвертор протиЕРС E_I . Випрямляч і інвертор пов'язані між собою через опір лінії R_L . Важливо відзначити, що і ЕРС, і протиЕРС - величина не постійна, вони можуть практично миттєво змінюватися під впливом регулюючих пристроїв незалежно один від одного. Це надає електропередачі властивість глибокої керованості, оскільки при цьому також змінюється передавана потужність [5].

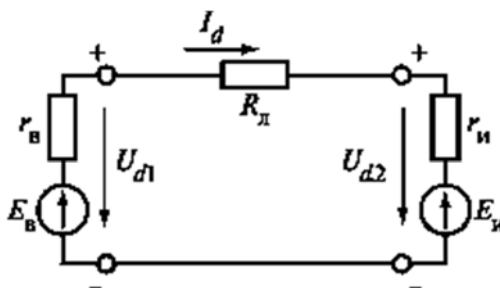


Рис. 3.1 – Схема заміщення електропередачі постійного струму [5]

Приймаємо основні електричні параметри електропередачі постійного струму, що необхідні для розрахунку параметрів лінії:

$U_d = 800$ кВ – номінальна напруга ЛЕП постійного струму;

$P_d = 750$ МВт – номінальна потужність ЛЕП постійного струму;

$l_d = 500$ км – номінальна довжина ЛЕП постійного струму;

Для вибору проводу лінії необхідно визначити струм, який буде в мережі в електропередачі постійного струму.

Потужність, що віддається випрямлячем в лінію постійного струму:

$$P_{1d} = U_{1d} * I_{1d}, \quad (3.1)$$

Отже, виходячи з цього виразу, повний струм, що віддається в лінію:

$$I_{1d} = \frac{P_{1d}}{U_{1d}} = \frac{750 * 10^6}{800 * 10^3} = 937,5 \text{ (A)}. \quad (3.2)$$

Струм, на стороні одного з полюсів буде складати:

$$I_{1d}^+ = \frac{P_{1d}}{U_{1d}^+} = \frac{375 * 10^6}{400 * 10^3} = 937,5 \text{ (A)}. \quad (3.3)$$

Таким чином, провід на кожному з полюсів повинен пропускати струм 938 А.

В цих виразах індексом d позначені струм I_{1d} , напруга U_{1d} , потужність P_{1d} , які відносяться до постійного струму (*direct* — прямий).

Відповідно до ПУЕ глава 1.3 (Таблиця 1.3.42 - Допустимі тривалі струми для неізолюваних проводів за ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия») [15]приймаємо:

мінімальний достатній переріз проводу складає 185 мм², це провід АС 185/29.

При застосуванні проводу АС 185/29 втрати в лінії складуть (для двох полюсів):

$$\Delta P_{\text{л}} = 2 * \frac{I_{1d}^{+2}}{n} * R_0 * l_d, \quad (3.4)$$

$$\Delta P_{\text{л}} = 2 * \frac{937,5^2}{3} * 0,1591 * 500 = 46.611 * 10^6 \text{ (Вт)}$$

де I_{1d}^+ – струм на одному полюсі,

R_0 – опір постійному струму для АС 185/29 на 1 км лінії при 20 °С,

l_d – довжина лінії,

n – кількість проводів на полюсі.

Тобто, при передачі електроенергії на постійному струмі і застосуванні проводу АС 185/29 втрати складуть 46.611 МВт, що становить 6.215 %. Для ЛЕП такого класу напруги це значні втрати. Втрати в лініях складають найбільшу частку від сумарних втрат при передачі на постійному струмі.

Конструкція полюса ПЛ постійного струму ідентична конструкції фази ПЛ змінного струму. Тут також застосовуються розщеплені дроти з двох причин. Перша полягає в великих струмах полюса, що зумовлює і великий сумарний перетин проводів полюса (кілька тисяч квадратних міліметрів). Проводи таких перетинів не випускаються в Україні, тому що доставка їх на трасу і подальший монтаж вкрай ускладнені. Тому використовується пучок проводів менших перетинів, з якими легше працювати [5].

Друга причина полягає в необхідності виключити загальне коронування проводів, для чого необхідно знизити напруженість електричного поля на поверхні проводу. З цією метою дроти, що входять в пучок, розташовані по вершинах правильного багатокутника на певній відстані один від одного. В результаті виключається можливість виникнення загальної корони і знижуються втрати потужності на місцеву корону, які для ліній постійного струму істотно менше, ніж для ліній змінного струму [5].

Необхідно також враховувати, що в ЛЕП над змінній напрузі (HVAC) більш інтенсивно утворюється коронний розряд, ніж на ЛЕП постійного струму. Втрати від коронного розряду можуть становити при поганих погодних умовах (дощ, мокрий сніг, паморозь, ожеледь, іній) до 40% від втрат на нагрівання проводів. Застосуванням проводів більшого діаметра (т. зв. «розширених»), а також «розщеплення» фаз зменшують втрати на коронний розряд, проте трохи збільшують вартість ЛЕП [16].

Проте, відповідно до доповіді «Некоторые вопросы оптимизации воздушных линий электропередачи переменного и постоянного тока» д.т.н. Н.Н. Тиходеева були розраховані оптимальні перерізи для ЛЕП постійного струму різних класів напруги [17].

Таблиця 3.1 – Оптимальні перетину полюсів і конструкція полюсів біполярних ПЛ $\pm(400 - 750)$ кВ [17]

U_n , кВ	P , МВт	Прийнята конструкція полюса, мм ²
± 400	1000	3×550
	1500	3×800
± 500	2000	4×650
± 600	3000	4×800
± 750	4500	5×800

Відповідно до табл. 3.1 оптимальна конструкція, найближча до завдання, для одного полюсу ЛЕП постійного струму класу напруги ± 400 кВ і потужністю 1000 МВт – це розщеплена конструкція з 3-х проводів перерізом 550 мм². Однак в Україні відсутні проводи з заданим перерізом, а також номінальна потужність передачі на четверть менша. Тому буде застосовано провід типу АС-500/64, перерізом 500 мм².

Таблиця 3.2 – Характеристики проводу АС-500/64

Зовнішня температура при застосуванні:	-60 °С до +50 °С
Максимальна температура проводу при роботі:	+90 °С
Діаметр зовнішній, АС-500/64:	30,6 мм
АС-500/64 має опір постійному струму при + 20 °С:	0,0588 Ом/км
Приблизна вага 1 км проводу АС-500/64:	1852 кг
Розривне зусилля не менше	148,257 кН

При застосуванні проводу АС 500/64 втрати в лінії складуть (для двох полюсів):

$$\Delta P_{\text{л}} = 2 * \frac{937,5^2}{3} * 0,0588 * 500 = 17.227 * 10^6 \text{ Вт}$$

Тобто, при передачі електроенергії на постійному струмі і застосуванні проводів 3×АС 500/64 втрати складуть 17.227 МВт, що становить 2.297 %.

3.2 Вибір опори для лінії електропередачі постійного струму

ПЛ постійного струму відрізняється від ПЛ змінного струму головним чином конструкцією опор. Можливі конструкції опор для різних типів ПЛ постійного струму наведені на рис. 3.2. Для цих опор потрібно менша витрата сталі, і їх конструкція, в порівнянні з опорами ПЛ змінного струму, простіше відповідного класу напруги та пропускної здатності. На рис. 3.2 показана металева проміжна опора повітряної лінії класу напруги 800 кВ [5].

На рис. 3.3 наведені конструкції проміжних опор лінії 800 кВ змінного струму і лінії ± 500 кВ постійного струму, накреслені в одному масштабі. Ці ПЛ мають приблизно однакову пропускну здатність. При цьому для ПЛ постійного струму ширина смуги відчуження на 25-30% менше, ніж для ПЛ змінного струму. Звідси менша вартість лінії постійного струму при інших рівних вихідних даних [5].

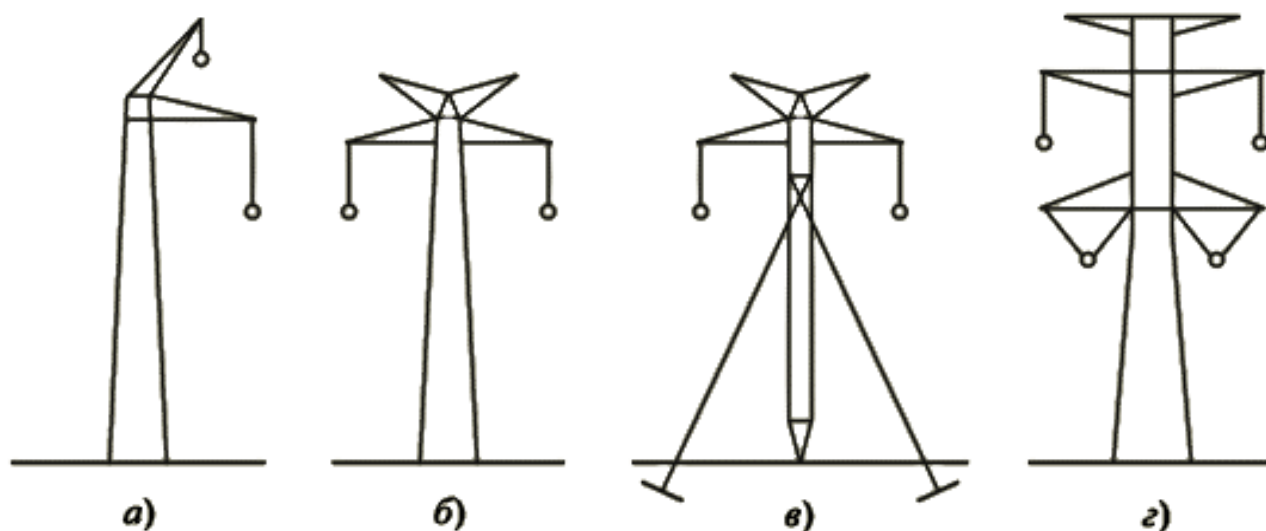


Рис. 3.2 – Схема заміщення опор ВН постійного струму:

а – проміжна вільностояча опора для уніполярної лінії; б – проміжна вільностояча опора для біполярної лінії; в – проміжна опора на відтяжках для біполярної лінії; г – проміжна вільностояча опора для двохцепної лінії.

Ефективність застосування далеких передач постійного струму обумовлена не тільки підвищенням стійкості міжсистемних зв'язків, але й низькими втратами

активної потужності, зменшенням розмірів конструкцій біполярної лінії в порівнянні з трифазною ПЛ змінного струму при однаковій потужності, відсутністю обмежень довжини передачі [7].

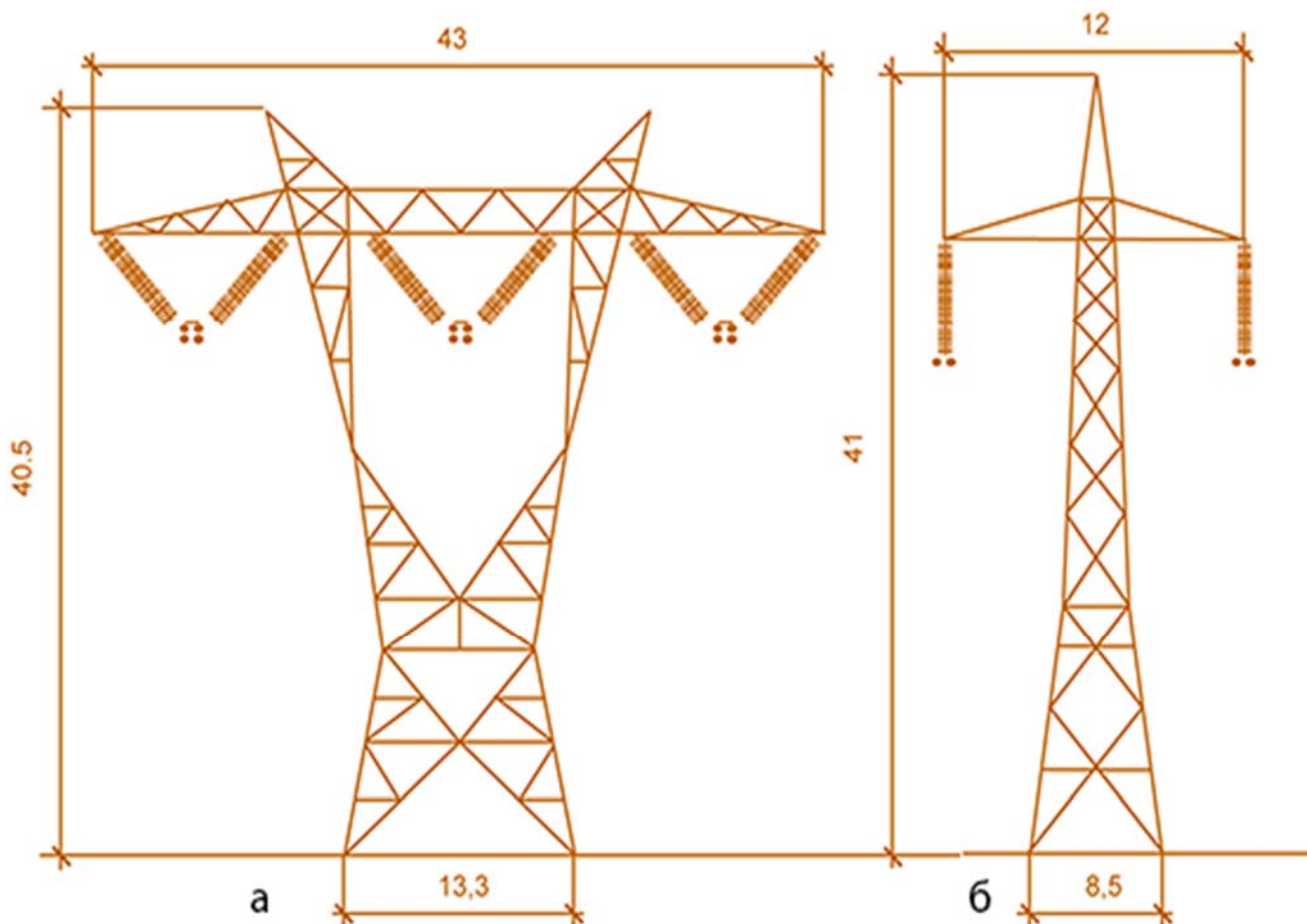


Рис. 3.3 – Порівняння опор ПЛ 800 кВ змінного струму (а) та ПЛ ± 500 кВ постійного струму (б) для однакової передаваної потужності (розміри зазначені в метрах) [7]

У доповіді [17] були представлені оптимальні опори для біполярних ЛЕП постійного струму різного класу напруги. Схеми опор з оптимальною геометрією стійок показані на рис. 3.4. У табл. 3.3 наведені деякі основні габарити ($2b$ - відстань між полюсами).

Таблиця 3.3 – Деякі основні габарити біполярних ВЛ (± 400 - ± 750) кВ [17]

ПЛ	Конструкція полюса	$2b$, м	Габарит провід-земля $-H_{\min}$, м	Довжина гірлянди, м	Повітряний проміжок між проводом і опорою при робочій напрузі і максимальному вітрі, м
± 400 кВ	3×АС 550/71	11,5	11,0	5,5	1,1
	3×АС 800/105	11,5	11,0	5,5	1,1
± 500 кВ	4×АС 650/79	15	12,0	7,0	1,5
± 600 кВ	4×АС 800/105	19	14,0	9,3	1,8
± 750 кВ	5×АС 800/105	23	16,0	12,0	2,2

Для зарубіжної практики електромережевого будівництва характерно індивідуальне проектування опор для конкретних ПЛ. Такий підхід дозволяє мінімізувати витрату матеріалів на опори. Однак індивідуальне проектування має ряд недоліків, найважливіші з яких:

- ускладнення і подорожчання виготовлення опор, зважаючи на необхідність частого переналагодження обладнання на заводах при замовленнях на різноманітні (не типові) конструкції;
- збільшення термінів введення ПЛ, з огляду на витрат часу на розробку проектів опор для кожної ПЛ, збільшення термінів виготовлення і монтажу [17].

Опори діючої в даний час уніфікації розроблялися в 60-70 р.р. У зв'язку з політикою, що проводилася в той час економії алюмінію, опори розраховані на застосування проводів відносно невеликих перетинів, що призводить до втрат енергії, що виробляється до 12%. Зважаючи на відсутність комп'ютерних програм розрахунки опор були дуже трудомісткі, що не дозволяло при розробці оптимізувати параметри конструкцій хоча б методом варіантного проектування. Тому опори діючої уніфікації не оптимальні навіть в тих умовах, на які вони запроектовані [17].

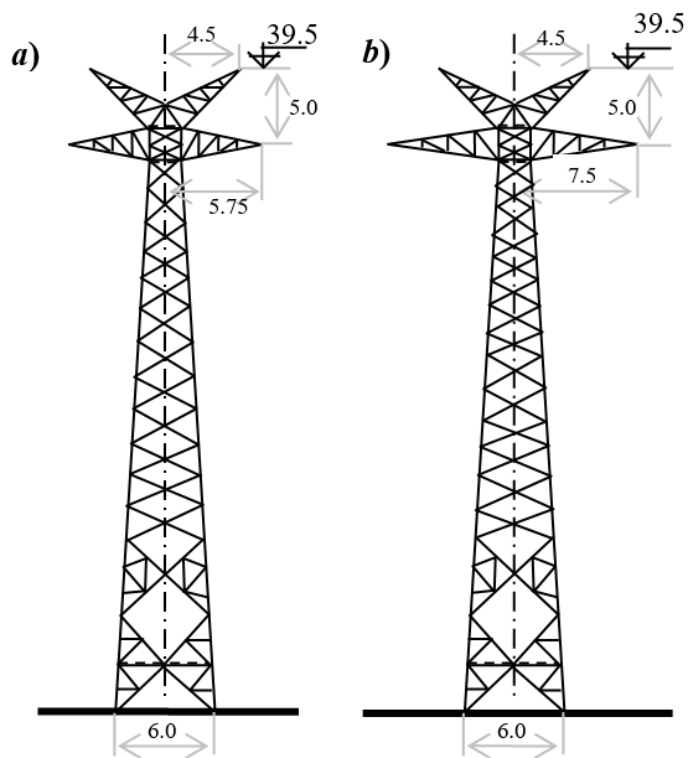


Рис. 3.4 – Опоры для біполярних ВЛ: а) ± 400 кВ, полюс $3 \times \text{АС } 550/71$; б) ± 500 кВ, полюс $4 \times \text{АС } 650/79$ [17]



Рис. 3.5 – Опоры для біполярної ЛЕП «Волгоград-Донбас» на напругу ± 400 кВ

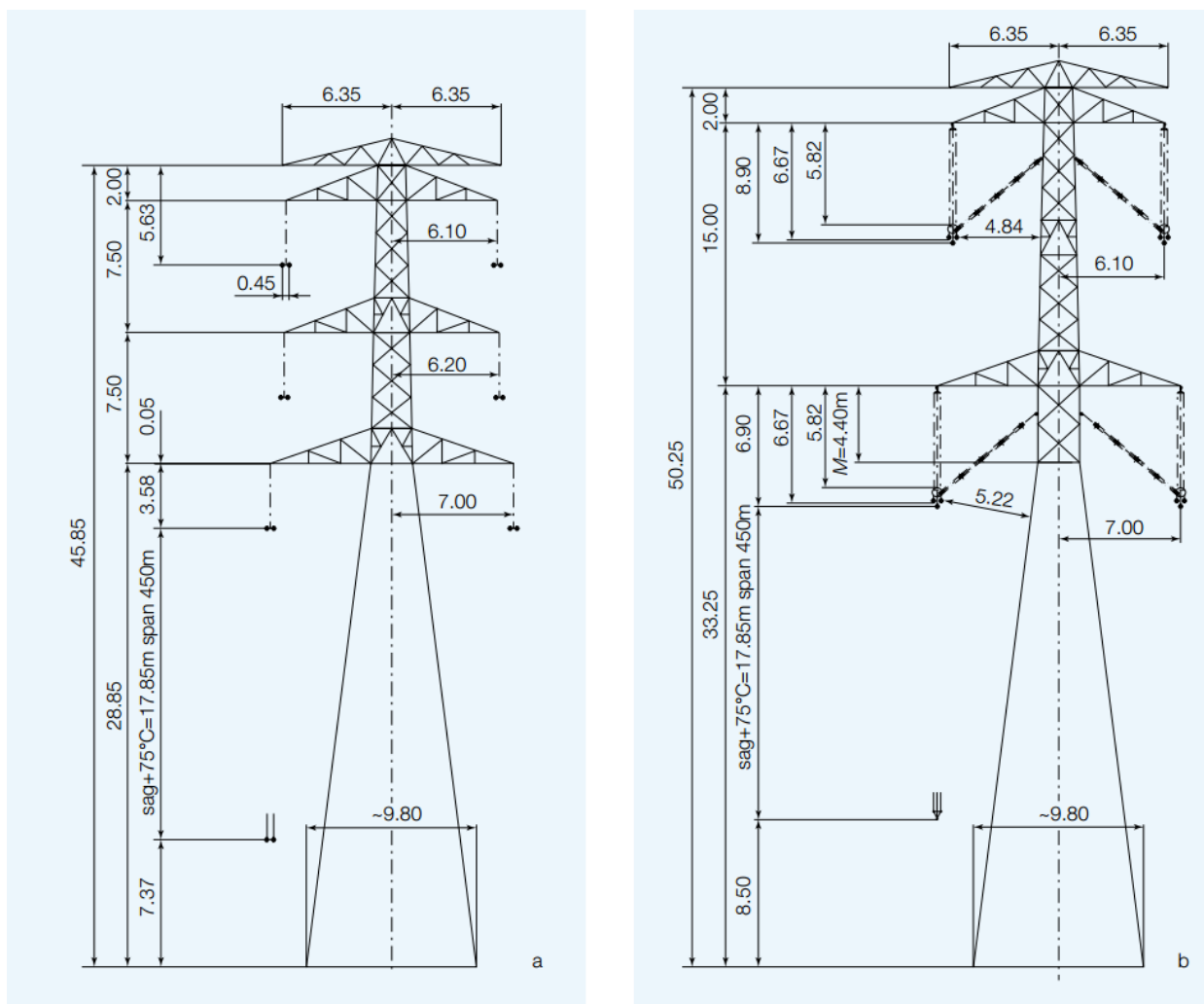


Рис. 3.6 – Конфігурація опори для двоцепної лінії Аба-Афам до (а) та після (б) реконфігурації

Для лінії Аба-Афам було встановлено додатковий блок довжиною 4,4 м. Окрім того, довжина гірлянди зросла з 3,58 м до 6,9 м. Проте відстань «провід-земля» змінилась лише на 1,08 м та склала 26,35 м [18]. Така реконфігурація може допомогти при переобладнанні лінії сусідніх класів напруги, щоб зменшити витрати на будівництво нової лінії.

3.3 Кліматичні умови

Дані про кліматичні умови [19] в (витяг з ДБН В.1.2-2:2006. СНББ. Навантаження і впливи. Норми проектування. Додаток Е для м. Київ):

- W_0 – вітрове навантаження = 370 Па;

- S_o – снігове навантаження = 1550 Па;
- B – товщина стінки ожеледі = 19 мм;
- W_v вітрове навантаження при ожеледі = 160 Па.
- Середня тривалість гроз у годинах, визначена за картами інтенсивної

грозової діяльності для регіонів з великим промисловим навантаженням становить $T_{гр} = 80$ годин/рік [19].

3.4 Розрахунок параметрів грозових імпульсів

Для забезпечення надійності електропостачання та захисту від ПУБ на лініях електропередачі використовуються грозозахисні троси. Залежно від розташування, кількості проводів на опорах повітряної лінії, електричного опору ґрунту, класу напруги повітряної лінії, необхідного ступеня грозозахисту монтують один або кілька тросів. Висота підвісу грозозахисних тросів визначається залежно від кута захисту, тобто кута між вертикаллю, що проходить через трос, й лінією, що з'єднує трос з крайнім проводом, який може змінюватися в широких межах і навіть бути від'ємним. Зазвичай грозозахисний трос роблять зі сталевих оцинкованих жил перетином від 50 до 70 мм². Захищеність лінії залежить від кута захисту, який при значеннях більших за 20° робить ураження блискавкою малоімовірним. У лініях на металевих опорах із напругою 110 кВ і вище грозозахисний трос підвішують зазвичай по всій довжині лінії, на лініях нижчої напруги — лише на підходах до електричних підстанцій [20].

Для розрахунку обрано опору, яка показана на рис. 3.4 а.

Відповідно до діючого ДСТУ Б В.2.5-38:2008 «УЛАШТУВАННЯ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД» [21]:

Короткий опис конструкції :

- Найбільша висота об'єкта 39.5 м .
- Довжина об'єкта – 500 км
- Ширина об'єкта – 12 м.

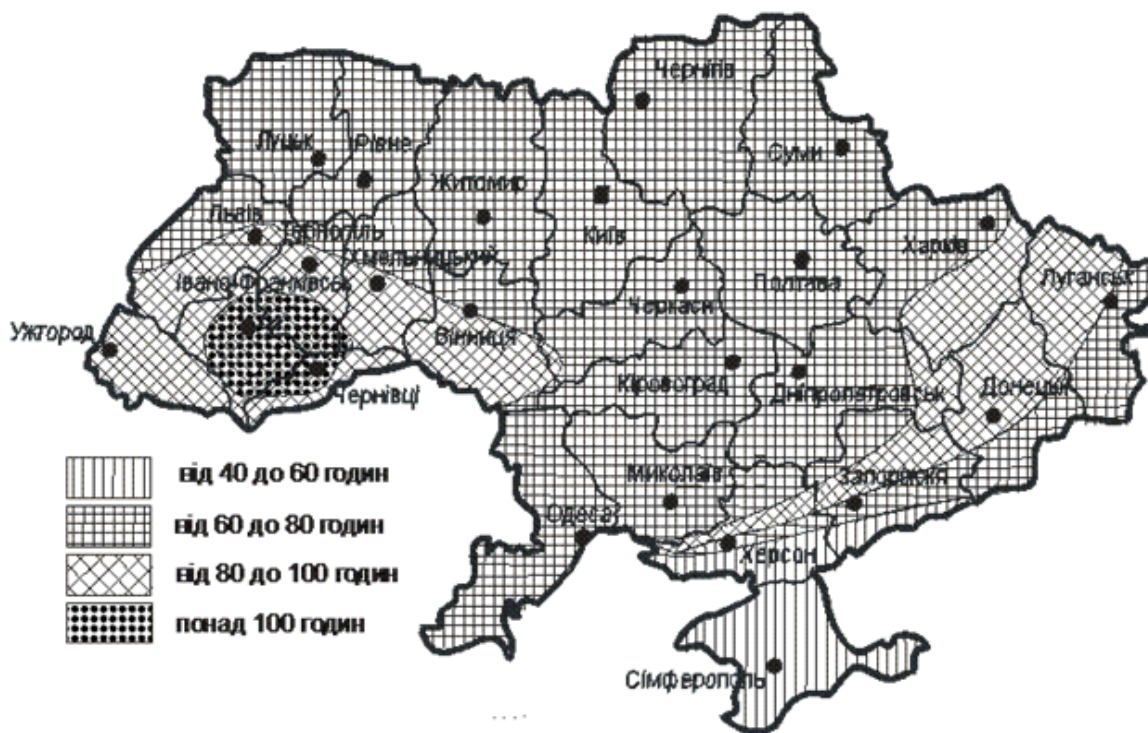


Рис. 3.7 – Карта середньої тривалості гроз за рік у годинах для території України [21]

Очікувана кількість уражень об'єкта блискавкою за рік N визначається згідно п.4.4 ДСТУ Б В.2.5-38:2008 за допомогою формули (4.3) для протяжного об'єкта довжиною L (лінії електропередавання, зв'язку тощо):

$$N = 6 \cdot L \cdot h_{об} \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (3.5)$$

де $h_{об}$ – найбільша висота об'єкта, м;

L – довжина об'єкта, м;

n – щільність ударів блискавки на 1 км² земної поверхні за рік, визначена за даними метеорологічних спостережень в місці розташування об'єкта, 1/км² рік.

$$n = \frac{6,7 \cdot T_{ep}}{100}, \frac{1}{\text{км}^2 \cdot \text{рік}}, \quad (3.6)$$

де $T_{гр}$ - середня тривалість гроз у годинах, визначена за картами інтенсивності грозової діяльності (Додаток Б) або за середніми багаторічними (не менш 10 років) даними метеостанції, найближчої до місця знаходження об'єкта.

$$n = \frac{6,7 \cdot T_{гр}}{100} = \frac{6,7 \cdot 80}{100} = 5.36 \text{ (разів)}$$

$$N = 6 \cdot 500000 \cdot 39.5 \cdot 5.36 \cdot 10^{-6} = 635.16 \text{ (разів)}$$

Отже, очікувана кількість уражень об'єкта блискавкою за рік $N = 635.16$. Тобто можна зробити висновок, що за 1 рік в цей об'єкт блискавка влучить 635 разів.

Для кожного РБЗ встановлені середні фіксовані параметри струму блискавки. І ймовірність того, що встановлені параметри струмів блискавки будуть відповідати параметрам природної блискавки наведені в табл. 3.8. Відповідно пункту 5 ДСТУ Б В.2.5-38:2008 параметри очікуваної блискавки мають відповідати значенням, наведеним в таблицях 3.4 – 3.8 [21].

Табл. 3.4 – Параметри першого імпульсу струму блискавки [21]

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Максимум струму I , кА	200	150	100
Тривалість фронту T_1 , мкс	10	10	10
Час напівспаду T_2 , мкс	350	350	350
Заряд в імпульсі $Q_{\text{сум}}$, Кл	100	75	50
Питома енергії в імпульсі W/R , МДж/Ом	10	5,6	2,5

Табл. 3.5 – Параметри повного розряду блискавки [21]

Параметр	РБЗ		
	I	II	III, IV
Повний заряд $Q_{\text{повн}}$, Кл	300	225	150

Табл. 3.6 – Параметри наступного імпульсу струму блискавки [21]

Параметр струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Максимум струму I , кА	50	37,5	25
Тривалість фронту T_1 , мкс	0,25	0,25	0,25
Час напівспаду T_2 , мкс	100	100	100
Середня крутість a , кА/мкс	200	150	100

Табл. 3.7 – Параметри тривалого струму блискавки в інтервалах між імпульсами [21]

Параметри струму	РБЗ		
	I	II	III, IV
Заряд $Q_{\text{трив}}^*$, Кл	200	150	100
Тривалість T , с	0,5	0,5	0,5
* $Q_{\text{трив}}$ - заряд, обумовлений тривалим протіканням струму в період між двома імпульсами струму блискавки.			

Табл. 3.8 – Імовірність того, що прийняті параметри струму блискавки будуть відповідати параметрам природних блискавок [21]

Імовірність того, що параметри струму блискавки	РБЗ			
	I	II	III	IV
будуть менші, ніж максимальні величини, наведені в табл. 1÷4	0,99	0,98	0,97	0,97
будуть більші, ніж мінімальні величини, наведені в табл. 5	0,99	0,97	0,91	0,84

Приймаємо надійність захисту від ПУБ (P_z) 0,99 для об'єкту I рівня блискавко захисту.

Висновки до третього розділу

1. Обрано конструкцію полюсу для ЛЕП постійного струму класу напруги 800 кВ – це три проводи на полюс поперечним перерізом 500 мм². Втрати в проводах ЛЕП при такій конструкції складають 17,227 МВт, що становить 2,297 %.
2. Обрано тип опори для біполярної ВЛ ± 400 кВ, яка показана на рис. 3.4 а з габаритом провід-земля 11 м та довжиною гірлянди 5,5 м.
3. Відповідно ДБН В.1.2-2:2006 вибрані кліматичні умови для Київської області та згідно ДСТУ Б В.2.5-38:2008 розраховано параметри грозових імпульсів струму і визначено кількість уражень лінії протяжністю 500 км.

4 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОПН ДЛЯ СХЕМИ ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПК

В розділі проведено розрахунки основних складових обмежувача перенапруг нелінійного для ліній електропередачі постійного струму класу напруги 800 кВ. Розраховано основні значення електричних величин ОПН, виконано порівняння з ОПН змінного струму подібного типу. Виконано розрахунок ізоляційної покритишки ОПН з провідними включеннями.

Розрахунки для вибору ОПН проводяться відповідно діючим нормам, описаним в СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47:2011 [22].

4.1 Розрахунок основних електричних характеристик ОПН

В зв'язку з відсутністю нормованих напруг для ОПН постійного струму, розрахункові значення перенапруг обирались для ОПН класу 500 кВ, тому що фазне значення напруги на постійній напрузі класу ± 400 кВ є близьким до значення $\frac{500}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 408,2$ кВ. В якості найближчого аналогу обираємо ОПН фірми АВВ типу HS Rexlim Т-Т відповідно Додатку Е, табл. Е1 [22].

Обираємо $U_{нрм} = 440$ кВ – найбільшу тривало допустиму робочу напругу в електричній мережі постійного струму з урахуванням коефіцієнту перевантаження $k_{п} = 1.1$.

Додатково врахуємо $k = 1.1$ – коефіцієнт рівня тривало допустимої робочої напруги.

Звідси визначаємо найбільшу тривалу допустиму робочу напругу ОПН:

$$U_{нро} = U_{нрм} \cdot k = 440 \cdot 1.1 = 484 \text{ (кВ)}. \quad (4.1)$$

У аналогу АВВ HS Rexlim Т-Т $U_{нро} = 317$ кВ. Це пов'язано з тим, що відповідна фазна напруга становить $\frac{500}{\sqrt{3}} = 288.675$ кВ, а при передачі електричної енергії на

постійному струмі напруга на полюсі становить 400 кВ (без врахування коефіцієнту перевантаження).

Найменший клас пропускної здатності ОПН на напругу 400 кВ за [22] – 3, але обираємо клас 5, в зв'язку з необхідністю врахування максимальних можливих перевантажень.

З [22] визначаємо $U_{\text{вип_к}} = 1050$ кВ – випробувальна напруга комутаційного імпульсу для лінії 500 кВ, що захищається ОПН.

Допустима розрахункова залишкова напруга на обмежувачі перенапруг нелінійному за комутаційного імпульсу [22]:

$$U_{\text{доп_к}} = \frac{U_{\text{вип_к}}}{1,15} = \frac{1050}{1,15} = 913,043 \text{ (кВ)}, \quad (4.2)$$

При тому, що $U_{\text{зал_к}} = 915$ кВ – допустима розрахункова залишкова напруга на ОПН за комутаційного імпульсу за табл. 5.4.1 [22].

Згідно [22] виконаємо перевірку на залишкову напругу на ОПН за комутаційного імпульсу, при якій повинна виконуватись умова:

$$U_{\text{зал_к ОПН}} \leq U_{\text{зал_к}} \rightarrow 913 \text{ кВ} \leq 915 \text{ кВ (виконується)}.$$

Розрахунковий струм комутаційного імпульсу становить 1 кА для напруг 330-500 кВ [22].

У аналогу ABB HS Rexlim T-T $U_{\text{зал_к ОПН}} = 793$ кВ. Отже в розрахованого ОПН коефіцієнт запасу по комутаційних перенапругах становить $k_{\text{зап_к}} = 1.15$.

Розраховуємо енергію, що поглинається ОПН при комутаційних перенапругах:

$$W_{\text{к}} = 4 * U_{\text{зал_к ОПН}} * (U_{\text{пн}} - U_{\text{зал_к ОПН}}) * \frac{T_{\text{пн}}}{Z} * 10^3 \quad (4.3)$$

де $U_{\text{пн}}$ – амплітуда перенапруги, кВ;

Z – хвильовий опір ПЛ за табл. 5.4.2 [22];

$k_{\text{п}}$ – коефіцієнт перенапруги за табл. 5.4.2 [22];

$T_{\text{пн}}$ – час проходження хвилі перенапруги, с.

Розраховуємо амплітуду перенапруги з урахуванням коефіцієнту комутаційних перенапруг для класу лінії 5 ($k_{\text{п}} = 2,2$):

$$U_{\text{пн}} = U_{\text{нрм}} * k_{\text{п}} = 440 * 2,2 = 968 \text{ (кВ)}. \quad (4.4)$$

Розраховуємо час проходження хвилі перенапруги по лінії ПЛ:

$$T_{\text{пн}} = \frac{L_{\text{ПЛ}}}{c} = \frac{500}{300000} = 1,667 * 10^{-3} \text{ (с)} \quad (4.5)$$

де $L_{\text{ПЛ}}$ – довжина повітряної лінії, км;

c – швидкість світла, км/с.

Тоді енергія, що поглинається ОПН при комутаційних перенапругах становить:

$$W_{\text{к}} = 4 * 793 * (968 - 793) * \frac{1,667 * 10^{-3}}{300} * 10^3 = 3,08 * 10^3 \text{ (кДж)}$$

У аналогу ABB HS Rexlim T-T повна енергоємність становить 6098 кДж, а коефіцієнт запасу з енергоємності за комутаційними перенапругами становить 6,5. В розрахованому ОПН енергоємність за комутаційними перенапругами становить 3080 кДж, отже коефіцієнт запасу з енергоємності за комутаційними перенапругами становить 1.98. Коефіцієнт запасу в розрахованому ОПН менший ніж в аналогу через більшу напругу на полюсі.

Допустима розрахункова залишкова напруга на ОПН за грозового імпульсу:

$$U_{\text{доп}_\Gamma} = \frac{U_{\text{вип}_\Gamma}}{1,4} = \frac{1425}{1,4} = 1017,857 \text{ (кВ)} \quad (4.6)$$

де $U_{\text{вип}_\Gamma} = 1425 \text{ кВ}$ – випробувальна напруга повного грозового імпульсу для напруги 500 кВ для ліній з ОПН.

$U_{\text{зал}_\Gamma} = 1018 \text{ кВ}$ – допустима розрахункова залишкова напруга на ОПН за повного грозового імпульсу за табл. 5.4.1 [22].

Виконаємо перевірку на залишкову напругу на ОПН за повного грозового імпульсу, повинна виконуватись умова:

$$U_{\text{зал}_\Gamma \text{ ОПН}} \leq U_{\text{зал}_\Gamma} \rightarrow 1017,86 \text{ кВ} \leq 1018 \text{ кВ (виконується)}$$

Розрахунковий струм повного грозового імпульсу становить 10 кА для напруг 330-500 кВ [22].

У аналогу АВВ HS Rexlim T-T $U_{\text{зал}_\Gamma \text{ ОПН}} = 908 \text{ кВ}$. Отже в розрахованого ОПН коефіцієнт запасу по грозовим перенапругам становить $k_{\text{зап}_\Gamma} = 1.12$.

Перевірка здатності ОПН до поглинання (розсіювання) енергії грозових перенапруг:

$$W_\Gamma = 2 * U_{\text{ПЛ}} * U_{\text{зал}_\Gamma \text{ ОПН}} * \frac{T_6}{Z} * 10^3. \quad (4.7)$$

де $U_{\text{ПЛ}}$ – 50%-ва імпульсна розрядна напруга гірлянд ізоляторів для класу напруги 500 кВ за табл.5.5.9, кВ;

Z – хвильовий опір ПЛ за табл. 5.4.2 [22];

T_6 – максимальна тривалість струму блискавки, с.

$$W_\Gamma = 2 * 2300 * 908 * \frac{3 * 10^{-4}}{300} * 10^3 = 4,18 * 10^3 \text{ (кДж)}$$

У аналогу АВВ HS Rexlim T-T повна енергоємність становить 6098 кДж, а коефіцієнт запасу з енергоємності за грозовими перенапругами становить 1,46. Отже АВВ HS Rexlim T-T задовольняє вимоги по енергоємності по захисту від грозових і комутаційних перенапруг.

Хоча для III СЗА за ГОСТ 9920 рекомендується $\lambda = 2,5 \text{ см/кВ}$, але з урахуванням певного запасу обираємо значення для IV ступеня забрудненості атмосфери, тобто $\lambda = 3,1 \text{ см/кВ}$.

Вибір мінімально допустимої довжини шляху витоку зовнішньої ізоляції ОПН:

$$L_{min} = \lambda \cdot U_{нрм} = 3,1 \cdot 440 = 1364 \text{ (см)} = 13640 \text{ (мм)} \quad (4.8)$$

де $U_{нрм}$ – найбільша тривало допустиму робоча напруга в електричній мережі за табл. 3.1 [22], кВ;

λ – питома довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції для IV ступеня забрудненості атмосфери, $\text{см}/\text{кВ}$.

Довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції ОПН $L_{ОПН}$ повинна бути більшою за розраховану мінімально допустиму довжину шляху витоку:

$$L_{ОПН} \geq L_{min}.$$

У аналогу АВВ HS Rexlim Т-Т $L_{ОПН} = 13900 \text{ мм}$. У розрахованого ОПН мінімально допустима довжина шляху витоку становить $L_{min} = 13640 \text{ мм}$. Отже умова $L_{ОПН} \geq L_{min}$ виконується:

$$13900 \text{ мм} \geq 13640 \text{ мм}.$$

Вибір ОПН за механічними характеристиками.

Розрахунок згинального моменту ОПН від сили вітру та натягу проводів:

$$M = \frac{1.29}{2} * V_{вітру}^2 * H_{ОПН} * (d_m + 2 * d_{ож}) * 0,8 * \frac{H_{ОПН}}{2} + H_{ОПН} * P_{пр} \quad (4.9)$$

де $V_{вітру}$ – швидкість вітру, $\text{м}/\text{с}$;

$d_{ож}$ – товщина стінки льоду, м;

$H_{ОПН}$ – висота ОПН, м;

d_m – зовнішній діаметр ізоляційної частини ОПН, м;

$P_{пр}$ – сила натягу проводів відповідно ГОСТ 16357-83, Н.

$$M = \frac{1.29}{2} * 40^2 * 4,89 * (0,3 + 2 * 19 * 10^{-3}) * 0,8 * \frac{4,89}{2} + 4,89 * 1500 =$$

$$= 1,067 * 10^4 \text{ (Н * м)}.$$

Дійсне значення витримуваного статичного навантаження ОПН повинно бути більшим за розраховане значення.

У аналогу АВВ HS Rexlim T-T $M_{\text{доп}} = 19000 \text{ Н * м}$. У розрахованого ОПН згинальний момент становить $M = 10670 \text{ Н * м}$. Отже умова $M_{\text{доп}} \geq M$ виконується:

$$19000 \text{ Н * м} \geq M = 10670 \text{ Н * м}.$$

Коефіцієнт запасу із статичних навантажень у АВВ HS Rexlim T-T становить 1.781.

4.2 Визначення провідності матеріалу ізоляційної покришки ОПН

Особливістю вибору ОПН для постійного струму є врахування струмів витоку по поверхні діелектрика покришки у довготривалому режимі роботи.

В якості аналогу обираємо ОПН фірми АВВ типу HS Rexlim T-T:

- висота ОПН – 4890 мм ($H_{\text{ОПН}}$);
- зовнішній діаметр ізолятора – 300 мм ($d_{\text{зовн}}$);
- ступінь забрудненості атмосфери – III;
- довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції – 13900 мм ($L_{\text{в}}$).

Приймаємо, що:

- довжина покришки $L_{\text{п}} = 4890 - a$ (мм), де a – сумарна висота верхнього та нижнього металевих фланців ОПН;
- виліт крила обребрення – 45 мм;
- товщина стінки покришки – 20 мм (із них 10 мм – склоепоксидний циліндр та 10 мм – силіконова покришка з омічною провідністю $\sigma_{\text{покр}}$);
- зовнішній діаметр покришки $d_{\text{зовнп}} = d_{\text{зовн}} - (2 * 45) = 210$ (мм).

Визначимо омічний опір силіконової покришки, нехтуючи внеском опору обребрення:

$$R_{\text{покр}} = \frac{1}{\sigma_{\text{покр}}} \cdot \frac{L_{\text{п}}}{\frac{\pi}{4} (200^2 - 190^2)}, \quad (4.10)$$

де $\sigma_{\text{покр}}$ – питома об’ємна провідність матеріалу покриття См/мм .

Вважаємо, що верхня частина покриття (по висоті $0 < \alpha < 1$) має підсушену зовнішню поверхню.

Тоді визначимо опір верхньої частини покриття:

$$R_{\text{покр}_{\text{верхн}}} = \frac{\alpha}{\sigma_{\text{покр}}} \cdot \frac{L_{\text{п}}}{\frac{\pi}{4} (210^2 - 190^2)}. \quad (4.11)$$

Опір нижньої частини покриття:

$$R_{\text{покр}_{\text{нижн}}} = \frac{1 - \alpha}{\sigma_{\text{покр}}} \cdot \frac{L_{\text{п}}}{\frac{\pi}{4} (210^2 - 190^2)}. \quad (4.12)$$

Опір нижньої частини покриття по шляху витoku визначаємо:

$$R_{\text{покр}_{\text{нижн_витoku}}} = \frac{1}{\sigma_{\text{норм}}} \cdot \frac{L_{\text{в}} * (1 - \alpha)}{\pi * d_{\text{ср_витoku}}}, \quad (4.13)$$

де $d_{\text{ср_витoku}} = \frac{300+210}{2} = 255 \text{ (мм)}$;

$\sigma_{\text{норм}}$ – нормована поверхнева провідність забруднення відповідно ГОСТ 9920 для ступеня забрудненості атмосфери III становить 20 мкСм ($20 * 10^{-6} \text{ См}$).

Опір верхньої частини покриття по шляху витoku:

$$R_{\text{покр}_{\text{верх_витoku}}} = \frac{1}{\sigma_{\text{норм}} * \beta} \cdot \frac{L_{\text{в}} * \alpha}{\pi * d_{\text{ср_витoku}}}, \quad (4.14)$$

де β – коефіцієнт зменшення провідності верхньої частини покриття по шляху витoku за рахунок підсушування ($\beta < 1$).

Фактичну напругу точки В визначаємо відповідно схеми рис. 4.1:

$$U_{В\phi} = \frac{\frac{R_{\text{покр}_{\text{нижн}}} * R_{\text{покр}_{\text{нижнвитоку}}}}{R_{\text{покр}_{\text{нижн}}} + R_{\text{покр}_{\text{нижнвитоку}}}} + \frac{\frac{R_{\text{покр}_{\text{верхн}}} * R_{\text{покр}_{\text{верхнвитоку}}}}{R_{\text{покр}_{\text{верхн}}} + R_{\text{покр}_{\text{верхнвитоку}}}}}{\frac{R_{\text{покр}_{\text{нижн}}} * R_{\text{покр}_{\text{нижнвитоку}}}}{R_{\text{покр}_{\text{нижн}}} + R_{\text{покр}_{\text{нижнвитоку}}}} + \frac{R_{\text{покр}_{\text{верхн}}} * R_{\text{покр}_{\text{верхнвитоку}}}}{R_{\text{покр}_{\text{верхн}}} + R_{\text{покр}_{\text{верхнвитоку}}}}} \cdot U_m. \quad (4.15)$$

Розрахункова напруга точки В при лінійному розподілі потенціалу:

$$U_{Вр} = (1 - \alpha) \cdot U_m. \quad (4.16)$$

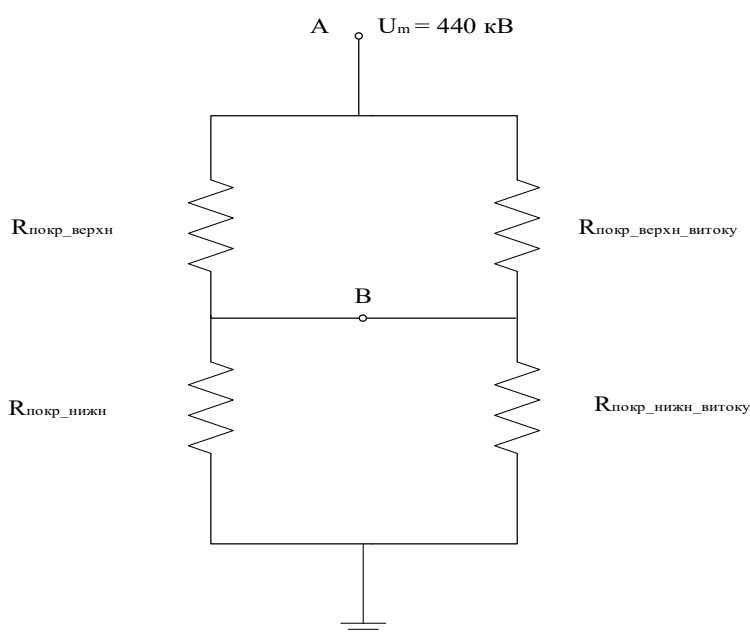


Рис. 4.1 – Схема заміщення для визначення максимальної різницевої напруги у горизонтальному перерізі ОПН

Різниця цих напруг $\Delta U_{В}$ визначає допустиму неузгодженість внутрішнього кола ОПН (по варисторам) та його зовнішнього кола (по покритті).

$$\Delta U_{В} = |U_{Вр} - U_{В\phi}|, \quad (4.17)$$

при цьому ΔU_B не повинна перевищувати орієнтовне значення 5% від U_m , тобто $\Delta U_B \leq 484 * 0,05 = 24,2$ (кВ).

Для перевірки розрахуємо додаткову потужність на нагрівання покриття:

$$P_{\text{дод}} = \frac{U_m^2}{R_{\text{покp}}} . \quad (4.18)$$

Струм варисторів визначаємо як 1% від $R_{\text{покp}}$, тому що в середині ОПН відсутні забруднення та волога, звідси:

$$R_{\text{варист}} = 100 * R_{\text{покp}} . \quad (4.19)$$

Отже варіюючи параметрами a , α , β визначаємо допустиму провідність матеріалу покриття. Для розрахунку ці параметри прийmemo в таких діапазонах: $200 \leq a \leq 300$; $0,3 \leq \alpha \leq 0,4$; $0,8 \leq \beta < 1$. Приймаємо попередньо, що $\sigma_{\text{покp}}$ складає 20 нСм/мм ($20 * 10^{-9} \text{ См/мм}$) та обраховуємо:

$$L_{\pi} = 4890 - 200 = 4690 \text{ (мм)};$$

$$R_{\text{покp}} = \frac{1}{20 * 10^{-9}} \cdot \frac{4690}{\frac{\pi}{4}(200^2 - 190^2)} = 7,656 * 10^7 \text{ (Ом)};$$

$$R_{\text{покp}_{\text{верхн}}} = \frac{0,3}{20 * 10^{-9}} \cdot \frac{4690}{\frac{\pi}{4}(210^2 - 190^2)} = 1,12 * 10^7 \text{ (Ом)};$$

(для $\alpha = 0,3$)

$$R_{\text{покp}_{\text{нижн}}} = \frac{1 - 0,3}{20 * 10^{-9}} \cdot \frac{4690}{\frac{\pi}{4}(210^2 - 190^2)} = 2,613 * 10^7 \text{ (Ом)};$$

(для $\alpha = 0,3$)

$$R_{\text{покр}_{\text{нижвитоку}}} = \frac{1}{20 * 10^{-6}} \cdot \frac{13900 * (1 - 0,3)}{\pi * 255} = 6,073 * 10^5 (\text{Ом});$$

(для $\alpha = 0,3$)

$$R_{\text{покр}_{\text{верхвитоку}}} = \frac{1}{20 * 10^{-6} * 0,8} \cdot \frac{13900 * 0,3}{\pi * 255} = 3,253 * 10^5 (\text{Ом});$$

(для $\alpha = 0,3$; $\beta = 0,8$)

$$U_{\text{вф}} = \frac{\frac{2,613 * 10^7 * 6,073 * 10^5}{2,613 * 10^7 + 6,073 * 10^5}}{\frac{2,613 * 10^7 * 6,073 * 10^5}{2,613 * 10^7 + 6,073 * 10^5} + \frac{1,12 * 10^7 * 3,253 * 10^5}{1,12 * 10^7 + 3,253 * 10^5}} \cdot 484 = 315,785 (\text{кВ});$$

$$U_{\text{вр}} = (1 - 0,3) \cdot 484 = 338,8 (\text{кВ});$$

(для $\alpha = 0,3$)

$$\Delta U_{\text{в}} = |338,8 - 315,785| = 23,015 (\text{кВ}).$$

$\Delta U_{\text{в}}$ не перевищує значення 5% від U_m , тобто $\Delta U_{\text{в}} \leq 24,2 (\text{кВ})$.

$$P_{\text{дод}} = \frac{(484 * 10^3)^2}{7,656 * 10^7} = 3,06 * 10^3 (\text{Вт})$$

$$R_{\text{варист}} = 100 * 7,656 * 10^7 = 7,656 * 10^9 (\text{Ом})$$

Результати для інших значень покажемо у вигляді зведеної таблиці.

Табл. 4.1 – Зведена таблиця розрахованих величин

a [мм]	200	225	250	275	300
α	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4
β	0,8	0,85	0,9	0,95	0,999
L_{Π} [мм]	4690	4665	4640	4615	4590
$R_{\text{покр}}$ [$\cdot 10^7 \text{ Ом}$]	7,656	7,615	7,574	7,533	7,493
$R_{\text{покр}_{\text{верхн}}}$ [$\cdot 10^7 \text{ Ом}$]	1,12	1,206	1,292	1,377	1,461
$R_{\text{покр}_{\text{нижн}}}$ [$\cdot 10^7 \text{ Ом}$]	2,613	2,506	2,4	2,295	2,192
$R_{\text{покр}_{\text{верх}_{\text{витоку}}}}$ [$\cdot 10^5 \text{ Ом}$]	3,253	3,317	3,374	3,425	3,474
$R_{\text{покр}_{\text{нижн}_{\text{витоку}}}}$ [$\cdot 10^5 \text{ Ом}$]	6,073	5,856	5,639	5,422	5,205
$U_{\text{вф}}$ [кВ]	315,785	309,428	303,112	296,785	290,286
$U_{\text{вр}}$ [кВ]	338,8	326,7	314,6	302,5	290,4
$\Delta U_{\text{в}}$ [кВ]	23,015	17,272	11,488	5,715	0,1135
$P_{\text{дод}}$ [кВт]	3,06	3,076	3,093	3,11	3,127
$R_{\text{варист}}$ [$\cdot 10^9 \text{ Ом}$]	7,656	7,615	7,574	7,533	7,493

За матеріалами розділу 4.2 розроблений алгоритм розрахунку на ПК питомої об'ємної провідності $\sigma_{\text{покр}}$ матеріалу покриття, який наведений у Додатку 1.

Висновки до четвертого розділу

1. Математичні розрахунки основних електричних характеристик ОПН постійного струму класу 800 кВ в порівнянні з найближчим аналогом ABB HS Rexlim T-T, показали:

- залишкова напруга у вибраному ОПН за комутаційного і грозового імпульсів менша за аналогічні значення в ABB HS Rexlim T-T і має певні коефіцієнти запасу;
 - повна енергоємність аналогу ОПН – ABB HS Rexlim T-T складає 6098 кДж, для розрахованого ОПН коефіцієнт запасу з енергоємності за комутаційними перенапругами становить 1.98, а коефіцієнт запасу з енергоємності за грозовими перенапругами 1.46;
 - довжина шляху витоку ОПН ABB HS Rexlim T-T складає 13900 мм та задовольняє значенню мінімально допустимої довжини шляху витоку зовнішньої ізоляції розрахованого ОПН;
 - допустиме значення статичних навантажень у ABB HS Rexlim T-T становить 19000 Н*м, а коефіцієнт запасу із статичних навантажень у розрахованого ОПН по відношенню до аналогу складає 1.78.
2. Розрахунки для визначення провідності матеріалу ізоляційної покришки для ОПН постійного струму при варіюванні параметрами a , α , β в діапазонах $200 \leq a \leq 300$; $0.3 \leq \alpha \leq 0.4$; $0.8 \leq \beta < 1$ показали, що:
- найменше відхилення від лінійного розподілу напруги по поверхні ізоляційної покришки спостерігається при значеннях $a = 300$ мм; $\alpha = 0.4$; $\beta = 0.999$ і складає 0,1135 кВ;
 - найбільше відхилення від лінійного розподілу напруги по поверхні ізоляційної покришки спостерігається при значеннях $a = 200$ мм; $\alpha = 0.3$; $\beta = 0.8$ і складає 23,015 кВ, що не перевищує допустимого значення 5% від U_m ;
 - попередньо прийняте значення $\sigma_{\text{покp}} = 20 \text{ нСм/мм}$ задовольняє вимоги до допустимого відхилення від лінійного розподілу напруги по висоті ОПН;

- додаткові втрати потужності на нагрівання ізоляційної покришки знаходяться в діапазоні $3,06 \text{ кВт} \leq P_{\text{дод}} \leq 3,127 \text{ кВт}$;
- в усталеному режимі роботи при заданих коефіцієнтах ізоляційна покришка повинна виконувати покладені на неї функції;
- розроблений алгоритм розрахунку на ПК питомої об'ємної провідності $\sigma_{\text{покр}}$ матеріалу покришки.

5 СТАРТАП: КОМЕРЦІАЛІЗАЦІЯ ВИБОРУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ КЛАСУ НАПРУГИ 800 КВ. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ

5.1 Опис ідеї проекту

Передача енергії на постійному струмі – це вже встановлена технологія, вона використовується більше 50 років. Протягом перших 30 років це було перспективна технологія, з обмеженою кількістю проектів на рік. Зі змінами у вимогах, а також у зв'язку з розвитком екологічних потреб, лінії постійного струму стали загальним інструментом у проектуванні та розробці мереж передачі електричної енергії. Основними факторами для цього є необхідність збільшення потужності передачі електроенергії та відстаней між її виробниками та споживачами.

Нелінійні обмежувачі перенапруг стали невід'ємною складовою будь яких електричних станцій. Набігаючі грозові перенапруги, комутаційні перенапруги мережі, короткі замикання на лінії призводять до збудження в лініях великих напруг і струмів, що можуть порушити роботу електричного обладнання підстанції і навіть вивести його з ладу. Для запобігання таким випадкам на підстанціях і використовуються нелінійні обмежувачі перенапруг, які розроблені в Японії, Швеції, Німеччині 10-20 років тому. Застосування нелінійних обмежувачів перенапруг дає змогу запобігти таким впливам або зменшити їх наслідки до мінімуму.

Табл. 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту методів визначення захисних властивостей високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди користувача</i>
Методика вибору нелінійних обмежувачів перенапруг для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ	1.Вибір основних електричних характеристик нелінійних обмежувачів перенапруг для захисту перетворювальних підстанцій постійного струму.	Можливість вибору ОПН за його основними електричними характеристиками
	2.Визначення дійсного значення витриманого статичного навантаження нелінійних обмежувачів перенапруг	Можливість вибору нелінійних обмежувачів перенапруг за його витримуваним механічними навантаженнями
	3. Розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН	Перевірка обраного ОПН для застосування на перетворювальних підстанціях постійного струму

Нижче представлений зміст ідеї, що пропонується, можливі напрямки застосування, основні вигоди, що може отримати користувач товару за кожним напрямком застосування, відмінності від існуючих аналогів та замінників. Перші три пункти подаються у вигляді таблиці (табл. 5.1) і дають цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Провівши аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів, можна стверджувати наступне: методика вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ дозволяє обрати ОПН за оптимальними ціновими показниками шляхом підбору та порівняння моделей, що відповідають розрахованим характеристикам.

Проведений порівняльний аналіз показників для власної ідеї за показниками:

а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) заносимо до табл. 5. 2.

Табл. 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї визначення захисних властивостей високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму

№ п/ п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтрал ьна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1.	Методика вибору нелінійних обмежувачів в перенапруг для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ	Визначення основних електричних характеристик к та дійсного значення витримувано го статичного навантаженн я ОПН постійного струму	Відсутні попередні розробки. Існуючі розробки в інших країнах недоступні (приховані для одержання переваг – першості нових технологій).	Потреба в розробці нормативно ї документац ії на державному рівні. Відсутні державні стандарти та рекомендац ії з вибору високовольтних ОПН постійного струму	Часткове використ ання існуючих методик для розрахун ку електрич них характери стик ОПН змінного струму	Широкий діапазон можливості застосовува ння матеріалів для вибору ОПН постійного струму

За приведеним переліком слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару можна стверджувати про конкурентоспроможність методики вибору високовольтних обмежувачів перенапруг для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведений аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Табл. 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
		Технологія 1	Чи вони наявні, або ж необхідно їх розробити/додати?	Чи вони доступні авторам проекту?
1	Методика вибору ОПН для передачі постійного струму класу напруги 800 кВ	Технологія розрахунку основних електричних характеристик ОПН з урахуванням провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН	Технології наявні, але відсутня нормативна документація для їх застосування.	Технології авторам не доступні

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: реалізація можлива за початком застосування технології передачі електричної енергії на постійному струмі в Україні та розробки відповідної нормативної документації на державному або галузевому рівні.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

До табл. 5.4 занесені результати проведеного аналізу попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.

Табл. 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	--
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Відсутність вимог до стандартизації та нормативної документації
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Потребують розробки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідома

Надалі визначені потенційні групи клієнтів та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Табл. 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<i>№</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти)</i>	<i>Відмінності у поведінці потенційних груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Вибір ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ	Електричні перетворювальні підстанції та вставки постійного струму для мереж класом напруги 800 кВ	Відсутня єдина стандартизація та нормативна документація	Вимоги не сформовані в Україні. В Німеччині, Японії, Китаї затребуваний максимальний розвиток передачі постійного струму.

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведений аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.8).

Табл. 5.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Збільшення курсу валюти	Здорожчання вартості помилки при виборі постачальника	Просування розробки унеможливорює зменшення ймовірності помилки
2	Протекційні заходи із підтримання українських виробників	Обмеження доступу іноземних компаній	Налагодження співпраці із вітчизняними виробниками

Табл. 5.7 – Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Ймовірне долучення до стандартів МЕК	Створення мінімально необхідної нормативної бази.	Розробка компанією пропозиції із урахуванням стандартів МЕК.
2	Зростання кількості введених в експлуатацію підстанцій на постійному струмі	Потенційне збільшення попиту.	Формування бази потенційних клієнтів.

Табл. 5.8 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<i>№</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ у порівнянні з конкурентом</i>						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Врахування основних електричних характеристик ОПН	15	X						
2.	Врахування дійсного значення витриманого статичного навантаження ОПН	10		X					
3.	Використання розрахунку провідності матеріалу ізоляційної покришки ОПН	15	X						
4.	Використання матеріалів, наведених в каталогах фірм-виробників	0					X		
5.	Розроблення нормативної документації	17						X	
6.	Загальний результат		-6	-2			+1	+2	

Аналізуючи табл. 5.8 можна зробити висновки: стартап-проект має такі основні переважаючі фактори конкурентоспроможності, як врахування основних електричних характеристик ОПН, визначення дійсного значення витриманого статичного навантаження ОПН, використання розрахунку провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН в сумі, які дають рейтинг товарів-конкурентів “-8”. Фактори конкурентоспроможності, за якими даний проект програє товарам-конкурентам, це використання матеріалів, наведених в каталогах фірм-виробників ОПН та необхідність розроблення нормативної документації, які дають рейтинг товарів-конкурентів “+3”. Сумарний рейтинг товарів-конкурентів складає “-5”.

На основі порівняльного аналізу сильних і слабких сторін методики вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ та факторів загроз і можливостей проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, який наведено у табл. 5.9.

Табл. 5.9 – SWOT- аналіз стартап-проекту

<p><u>Сильні сторони:</u> в методиці присутні матеріали для врахування основних електричних характеристик ОПН, визначення дійсного значення статичного навантаження. Особливістю вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ є розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН.</p>	<p><u>Слабкі сторони:</u> відсутність нормативної документації на державному рівні. Необхідне створення нормативно-правової бази на загальнодержавному рівні.</p>
<p><u>Можливості:</u> на основі розробленої методики вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ на початкових етапах можливе розроблення нормативної бази для ліній постійного струму на основі стандартів МЕК та зростання попиту на послуги оцінювання ОПН.</p>	<p><u>Загрози:</u> нестабільність економіки та залежність вартості ОПН від курсу іноземної валюти. Зростання цінового фактора для споживачів у зв'язку із зростанням ціни на ОПН. Обмеження ринку постачальників вітчизняними компаніями.</p>

Рекомендований час для виведення на ринок методики вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ у 2018-2019 роках.

Висновки до п'ятого розділу

1. Оскільки попит на даний проект на ринку наявний, динаміка ринку зростає, можна зробити висновок щодо комерціалізації методу вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ – існують перспективи впровадження даної технології для огляду на бар'єри входження, потенційні групи клієнтів, стан конкуренції, конкурентоспроможність проекту.

2. За умов розроблення в Україні нормативно-правової бази відповідно до міжнародних стандартів можливе впровадження проекту вибір ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ, розроблення комп'ютерно-інтегрованої моделі для масової реалізації, а також єдиної системи стандартизації даного типу електричного обладнання.

3. Рекомендована комерціалізація методики вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ у 2018-2019 роках.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В магістерській дисертаційній роботі отримано розвиток теорії вибору нелінійних обмежувачів перенапруг для електропередачі постійного струму і на цій основі розв'язано актуальну науково-технічну задачу вибору обмежувачів перенапруг нелінійних для передачі електричної енергії на постійному струмі класу 800 кВ. Одержані результати дозволяють вирішити ряд задач по вибору обмежувачів перенапруг для передач електричної енергії по лініям постійного струму. Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному.

1. Проведено аналіз літературних джерел стосовно існуючих обмежувачів перенапруг. Оглянуто їх конструкції, принцип дії та основні технічні характеристики.
2. Проведено аналіз областей застосування електропередачі постійного струму. Визначено області, де застосування постійного струму буде більш ефективно ніж при застосуванні змінного струму – це застосування передачі електричної енергії на постійному струмі для повітряних ліній електропередачі, підземних і підводних кабелів.
3. Показано, що індекс електромагнітного середовища для ліній постійного струму відповідає міжнародним стандартам МЕК в частині рівнів електричного поля та радіоперешкод.
4. Проведено аналіз застосування в міжнародній практиці схем для електропередачі і вставок постійного струму. Визначено переваги і недоліки застосування передачі електричної енергії на постійному струмі.
5. Виконано вибір конструкції полюсу для ЛЕП постійного струму, обрано оптимальну кількість і переріз проводів. Виконано селекцію оптимального типу опор для передачі енергії на постійному струмі.
6. Вибрані оптимальні кліматичні умови для регіону будівництва ЛЕП постійного струму та для даних умов виконано розрахунок кількості уражень блискавки та параметрів грозових імпульсів.

7. Виконано розрахунок основних електричних характеристик обмежувача перенапруг, визначено значення допустимих статичних навантажень ОПН. Проведено порівняння аналогічних значень з аналогом на змінному струмі, яким обрано ОПН типу ABB HS Rexlim T-T клас 500 кВ. Визначені коефіцієнти запасу.
8. Розроблено алгоритм розрахунку на ПК питомої об'ємної провідності $\sigma_{\text{покp}}$ матеріалу покриття на основі якого виконано розрахунок для визначення провідності матеріалу ізоляційної покриття для ОПН постійного струму при варіюванні параметрів a , α , β .
9. Проведений маркетинговий аналіз вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ. Оскільки попит на даний проект на ринку наявний, динаміка ринку зростає, можна зробити висновок щодо комерціалізації методу вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ: наявні перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції, конкурентоспроможність проекту за умов розроблення в Україні нормативно-правової бази відповідно до міжнародних стандартів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Ограничитель перенапряжения [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ограничитель_перенапряжения..
- [2] Школа молодого опнщика, назначение и принцип действия ОПН [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://baltenergo.spb.ru/articles_5.php..
- [3] ОПН ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://atrans.in.ua/opn-ogranichiteli-perenapryazheniya/c24..>
- [4] Что такое ограничитель перенапряжения? [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://samelectrik.ru/chto-takoe-ogranichitel-perenapryazheniya.html..>
- [5] Бурман А. П. СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА / А. П. Бурман, В. А. Строева., 2004..
- [6] M. P. Bahrman, «The ABCs of HVDC transmission technologies,» IEEE Power & Energy Magazine, p. 32–44, 2007.
- [7] Плачкова С. Г., Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем, Київ: Фенікс, 2013, р. 304 с.
- [8] IEC 60099-9-2014 Surge arresters - Part 9: Metal-oxide surge arresters without gaps for HVDC converter stations, 2014.
- [9] Високовольтна лінія постійного струму Волгоград-Донбас [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Високовольтна_лінія_постійного_струму_Волгоград-Донбас..
- [10] Особенности современного выбора основных конструктивных элементов ВЛ постоянного тока. // №2. – 2017. – №77. – С. 154–170..
- [11] Zehong Liu, Senior Member, CSEE, Senior Member, IEEE, Jun Yu, Xianshan Guo, Tao Sun, and Jin Zhang, «Survey of Technologies of Line Commutated Converter Based

High Voltage Direct Current Transmission in China,» CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, т. 1, № 2, JUNE 2015.

- [12] A, Bharani vasan, «ADVANCEMENTS IN HVDC TRANSMISSION AND FACTS TECHNOLOGY,» SKP Engineering college, pp. 1-12, 2013.
- [13] «Special Report 60 years of HVDC,» ABB review, 2016.
- [14] Высоковольтные линии постоянного и переменного тока. Генерация напряжения в электротехнике. Часть 1 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.380v.ru/reference/tech-articles/327-direct-current-lines-01..>
- [15] Правила улаштування електроустановок – Київ: Форт, 2017. – 760 с..
- [16] «Зотин. В преддверии возрождения постоянного тока. Часть 1 / Зотин. // Медиа КиТ. – 2013. – С. 4–9.».
- [17] Тиходеев Н. Н., «Некоторые вопросы оптимизации воздушных линий электропередачи переменного и постоянного тока / Н. Н. Тиходеев, А. А. Зевин, Л. И. Качановская. // Семинар "Прогресс в проектировании, строительстве и эксплуатации электрических сетей – ЛЭП 2003". – 2003.».
- [18] «Dr. Michael Häusler. Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings / Dr. Michael Häusler. // ABB Review. – 1997. – №3. – С. 4–11.».
- [19] «ДБН В.1.2-2:2006. СНББ. Навантаження і впливи. Норми проектування.. // МІНБУД УКРАЇНИ. – 2006.».
- [20] «Грозозахисний трос [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Грозозахисний_трос.».
- [21] «ДСТУ Б В.2.5-38:2008. УЛАШТУВАННЯ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД. // Мінрегіонбуд. – 2009. – С. 4–6.».
- [22] СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47:2011, Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанови щодо вибору та застосування Бржезицький В., Крисенко Д., Київ: ДП "НЕК "Укренерго", 2011.

ДОДАТОК 1

Алгоритм розрахунку на ПК питомої об'ємної провідності $\sigma_{\text{покр}}$ матеріалу

